



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Kasdi-Merbah Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Genie Civil et Hydraulique



N° d'ordre :

Série :

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Présentée par:

Mr. SLIMANI Said

Thème

**Etude de la méthode de répartition de l'eau de foggara et sa
vulnérabilité à la pollution dans la région d'Adrar.**

Soutenue publiquement le : 13 décembre 2021

Devant le jury composé de :

KATEB Samir	Pr	Université de Ouargla	Président
BOUTOUTAOU Djamel	Pr	Université de Ouargla	Directeur de thèse
OULHACI Dalila	MCA	Université de Ouargla	Examinatrice
KALLOUM Slimane	Pr	Université d'Adrar	Examineur
BENNACER Lyacine	MCA	Université d'Adrar	Examineur
KHECHANA salim	Pr	Université de Eloued	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère,

Mes frères,

Ma femme,

Mon fils.

Remerciements

Je tiens à témoigner de mon respect et ma profonde gratitude a mon directeur de thèse professeur Djamel BOUTOUTAOU pour son accompagnement appréciable, son encouragement et sa disponibilité durant toute cette période de réalisation de ma thèse.

Mes remerciements vont également aux professeurs M. Salim BENZIADA et Ahmed KETTEB pour tout ce qu'ils ont fait pour l'aboutissement de ce travail, leurs aides, conseils et orientation m'ont beaucoup aidé pour avancer dans mon travail de recherche.

Je remercie vivement messieurs Bahous NASRI, Djaloul BELBALI, Ahmed FELLALI, Abderrahmane GARMATI. Mes remerciements sont adressés également aux établissements ANRH et l'observatoire de la foggara antenne d'Adrar. Je remercie également tous mes collègues à la faculté des sciences et de la technologie, en particulier le département de la science de la matière de l'université d'Adrar. Le département du génie civil et hydraulique université de Ouargla.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du Jury : KATEB Samir et OULHACI Dalila de l'université d'Ouargla, KALLOUM Slimane et BENNACER Lyacine de l'université d'Adrar, KHECHANA Salim de l'université d'Eloued pour avoir accepté d'évaluer et examiner ce travail et de s'intéresser à la problématique de ma recherche.

De peur d'en avoir oublier, je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse.

تعتبر المياه الجوفية مورداً بالغ الأهمية في العديد من البلدان ، لا سيما في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. أدى تطور المستوطنات والأنشطة الزراعية وزيادة عمليات الاستغلال في منطقة أدرار إلى تدهور جودة المياه الجوفية وأثر سلبيًا على الأداء السليم لنظام الفجارة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة نظام الفجارة كمأ ونوعاً. على هذا الأساس تم تقسيم دراستنا إلى قسمين: في الجزء الأول من هذه الدراسة ، تم وصف نظام استغلال الطبقة البيئية القارية من خلال تحديد دورها الأساسي في الوجود والإمداد الدائم بالمياه للنظام الألفي الفقارة. أظهرت القياسات التجريبية لقياس التدفق باستخدام شفتي تمنطيط وتيميمون انسجاما في القياسات وتوافقا مقبولا بين القيم المقاسة لتدفق الحبة وكسورها. يهدف الجزء الثاني من العمل إلى تقييم حالة تلوث مياه الفقارة باستخدام طريقة DRASTIC من أجل إظهار المناطق الأكثر عرضة للتلوث.

تم انشاء خريطة تعرض الفقارات لتلوث المياه في منطقة الدراسة حيث افرزت أربعة مجالات بدرجات متفاوتة الضعف: منطقة ضعيفة جدا ، تقع في منطقة تمنطيط بنسبة 3.88%. يمكن تفسير هذا الضعف المنخفض من خلال عدم نفاذية التكوينات الصخرية وارتفاع عمق منسوب المياه في هذه المنطقة. فئة ضعيفة: تحتل مساحة كبيرة من المنطقة المدروسة (68.23%). إنها الطبقة الأكثر هيمنة على الخريطة. غطت هذه الطبقة جزءاً كبيراً من منطقة تمنطيط وجزءاً من بلدية أدرار مقر الولاية. فئة الضعف المتوسط (27.08%) من منطقة الدراسة. وهي تقع في مناطق بلدية بودة وأولاد أحمد وبلدية أدرار مقر الولاية. حماية المياه الجوفية في هذه الفئة غير مؤكدة.

فئة الضعف الشديد: تقع هذه الفئة في منطقة بودة بنسبة 0.81% من مجمل المساحة المدروسة باعتبار طبيعة التربة الرملية.

كلمات مفتاحية: أدرار ، الفجارة ، شقفة ، تلوث ، DRASTIC

Résumé

Les eaux souterraines constituent une ressource cruciale dans de nombreux pays et plus particulièrement dans les zones arides et semi-arides. Le développement des agglomérations et des activités agricoles et l'accroissement des prélèvements dans la région d'Adrar a entraîné une dégradation de la qualité des eaux souterraines et a influencé négativement sur le bon fonctionnement de système foggara.

Le but de ce travail est d'étudier le système de foggara en terme quantité et qualité. sur cette base notre étude a été déclinée en deux parties :

Dans la première partie de cette étude, une description du système d'exploitation du continental intercalaire a été effectuée en précisant son rôle essentiel dans l'existence et l'alimentation pérenne en eau du système millénaire des foggaras. Les mesures expérimentalement des jaugeages en débitmètre à l'aide des deux *chekfas* de Tamentit et de Timimoun ont montré la concordance des mesures et la conformité entre les valeurs mesurées du débit de *habba* et leurs fractions.

La deuxième partie du travail a pour but d'évaluer l'état de pollution des eaux de la foggara en utilisant la méthode DRASTIC afin de montrer les zones les plus vulnérables à la pollution.

Une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux de foggaras dans la région d'étude a été établie et relève quatre zones de degré de vulnérabilité variables : Une zone de très faible vulnérabilité, elle se localise dans la région de Tamentit avec un pourcentage de 3,88 %. On peut expliquer cette faible vulnérabilité par l'imperméabilité des formations lithologiques et la forte profondeur de la nappe dans cette région.

Classe de faible vulnérabilité : Elle occupe une grande partie de la région étudiée (68,23 %). C'est la classe la plus dominante sur la carte réalisée. Cette classe a couvert une grande partie de la région de Tamentit et une partie d'Adrar chef lieu.

Classe de moyenne vulnérabilité (27,08 %) de la superficie étudiée. Elle est localisée dans les régions de Bouda, Ouled Ahmed et Adrar chef lieu. La protection des eaux souterraines dans cette classe est incertaine.

Classe de forte vulnérabilité : cette classe est localisée dans la région de Bouda avec un pourcentage de 0,81 % de la superficie globale étudiée ou la nature de sol est peu évaluée (sable).

Mots clés : Adrar, foggara, *chekfa*, pollution, DRASTIC.

Abstract

Groundwater is a crucial resource in many countries, especially in arid and semi-arid areas. The development of settlements and agricultural activities and the increase of withdrawals in the Adrar region has led to a degradation of groundwater quality and has negatively influenced the proper functioning of the foggara system.

The aim of this work is to study the foggara system in terms of quantity and quality. On this basis our study has been divided into two parts:

In the first part of this study, a description of the system of exploitation of the intercalary continent was carried out by specifying its essential role in the existence and the perennial supply in water of the millennial system of foggaras. The experimental measurements of the gauging in flowmeter using the two chekfas of Tamentit and Timimoun showed the concordance of the measurements and the conformity between the measured values of the flow of habba and their fractions.

The second part of the work aims to assess the pollution status of the foggara waters using the DRASTIC method in order to show the most vulnerable areas to pollution.

A map of vulnerability to pollution of water foggaras in the study area was established and raises four areas of varying degrees of vulnerability: An area of very low vulnerability, it is located in the region of Tamentit with a percentage of 3.88%. This low vulnerability can be explained by the impermeability of the lithological formations and the high depth of the water table in this region.

Class of low vulnerability: It occupies a large part of the area studied (68.23%). It is the most dominant class on the map. This class covered a large part of the region of Tamentit and part of Adrar chief town.

Class of medium vulnerability (27.08%) of the area studied. It is located in the regions of Bouda, Ouled Ahmed and Adrar chief town. The protection of groundwater in this class is uncertain.

Class of high vulnerability: this class is located in the region of Bouda with a percentage of 0.81% of the overall area studied or the nature of soil is poorly assessed (sand).

Keywords : Adrar, foggara, *chekfa*, pollution, DRASTIC.

Sommaire

Dédicaces	I
Remerciements	II
Résumé	III
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XIV
Liste des abréviations	XVI
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Etude du milieu physique et climatique de la région d'etude	
1.1. Introduction	3
1.2. Situation géographique.....	3
1.3. Aspect géomorphologique.....	4
1.3.1. Le plateau	4
1.3.2. La dépression.....	4
1.3.3. Erg	4
1.3.4. Reg	4
1.4. Aspect socioéconomique	4
1.4.1. Agriculture	4
1.4.2. Elevage.....	4
1.4.3. Industrie.....	5
1.4.4. Tourisme.....	5
1.5. Etude climatologique.....	5
1.5.1. Température	5
1.4.2.1 Températures moyennes mensuelles.....	5
1.5.2. Précipitation	6
➤ Précipitations moyennes mensuelles.....	6
1.5.3. La nébulosité	7
1.5.4. L'humidité.....	8
1.5.4.1. L'humidité absolue	8

1.5.4.2.	L'humidité relative	8
1.5.5.	Les vents.....	9
1.5.6.	L'évaporation	9
1.5.7.	L'évapotranspiration	10
a)	Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la formule de Thornthwaite	10
1.5.8.	Bilan hydrique par la méthode Thornthwaite.....	12
1.5.9.	Quotient pluviométrique d'Emberger	13
1.5.10.	Indice de Martonne	14
1.6.	Conclusion	15
Chapitre 2 Etude hydrogéologique de la zone d'étude		
2.1.	Introduction	17
2.2.	System aquifères (SASS)	17
2.3.	Continental intercalaire (CI).....	18
2.4.	Caractéristiques principales du CI.....	20
2.4.1.	Lithologie de la nappe du Continental Intercalaire	20
2.4.2.	Epaisseur saturée du (CI)	21
2.4.3.	Paramètres hydrodynamiques	21
2.4.4.	Puissance utile du réservoir du CI.....	22
2.4.5.	La piézométrie de la nappe du continental intercalaire.....	22
2.5.	Conclusion	23
Chapitre 3 Origine, et principe de fonctionnement du système foggara		
3.1.	Introduction	25
3.2.	Historique sur le système foggara dans le monde	25
3.3.	Système d'aqueduc en Luxemburg	25
3.4.	Système du Qanat en Iran.....	27
3.5.	Qanat en Espagne	27
3.6.	Aqueduc en Rome	29
3.7.	Qanat en Arabie saoudite.....	29

3.8.	Qanta en Égypte.....	30
3.9.	Qanat à Oman	31
3.10.	Qanat en chine	32
3.11.	Khettara au maroc	33
3.12.	Système de foggara en Algérie	33
3.13.	Principe de fonctionnement de système foggara	34
3.14.	Gestion et partage des eaux de foggara	35
3.15.	Base de donnée sur la foggara	37
3.16.	Conclusion	37
 Chapitre 4 Matériels et méthodes		
4.1.	Introduction	39
4.2.	Partie I : Etude quantitative de système de foggaras	39
4.2.1.	Mode de partage des eaux de foggaras.....	39
4.2.2.	Fabrication de la <i>chekfa</i>	40
4.2.3.	Exemple sur la distribution des eaux de foggara.....	41
4.3.	Partie II : Etude qualitative (vulnérabilité a la pollution) de système de foggaras.....	42
4.3.1.	Généralité sur la pollution des eaux souterraines.....	42
4.3.2.	Types de pollution.....	42
1.	Pollution physique.....	42
➤	Pollution solide.....	42
➤	Pollution thermique :	42
➤	Pollution chimique :	42
➤	Pollution microbiologique :	42
4.3.3.	Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux foggara	43
4.3.4.	Description de la méthode GOD	44
4.3.5.	Description de la méthode SINTACS	45
4.3.6.	Description de la méthode EPIK.....	45
4.3.7.	Description de la méthode PI	45

4.3.8.	Description de la méthode COP	45
4.3.9.	Description de la méthode DRASTIC.....	46
4.3.10.	Profondeur de la nappe phréatique	48
4.3.11.	Recharge nette	49
4.3.12.	Nature du milieu aquifère.....	49
4.3.13.	Milieu du sol.....	50
4.3.14.	Topographie.....	50
4.3.15.	Impact de la zone vadose.....	51
4.3.16.	Conductivité hydraulique	52
4.3.17.	Indice de vulnérabilité DRASTIC (ID)	53
4.4.	Méthodes analytiques des paramètres physicochimiques des eaux des foggaras	53
4.5.	Conclusion.....	54
Chapitre 5 Résultats et discussion		
5.1.	Introduction	56
5.2.	Partie I : étalonnage de <i>chekfa</i> de la région Tamentit.....	56
5.2.1.	<i>Chekfa</i> de Tamentit (référence 5,5 mm).....	56
5.2.2.	Résultat de l'analyse de variance	57
5.3.	Partie II : vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara.....	57
5.3.1.	Profondeur de nappe.....	59
5.3.2.	Recharge nette	61
5.3.3.	Nature du milieu aquifère.....	62
5.3.4.	Milieu du sol.....	62
5.3.5.	Topographie	65
5.3.6.	Impact de la zone vadose	65
5.3.7.	Conductivité hydraulique	68
5.3.8.	Carte de l'indice de vulnérabilité (carte de synthèse).....	68
5.4.	Hydrochimie des eaux de foggara	73
5.5.	Propriétés physico-chimiques de l'eau souterraine.....	73

5.5.1.	Température	74
5.5.2.	Concentration en ions hydrogène (pH)	74
5.5.3.	Résidus sec (TDS).....	75
5.5.4.	La conductivité électrique (CE)	75
5.5.5.	Dureté totale :.....	76
5.5.6.	Les éléments majeurs	76
1.	Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+).....	76
a.	Le Calcium (Ca^{++}).....	76
b.	Le Magnésium (Mg^{++}).....	76
c.	Sodium Na^+	76
d.	Potassium (K^+)	76
2.	Les anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2})	77
a.	Les chlorures (Cl^-)	77
b.	Les Bicarbonates (HCO_3^-).....	77
c.	Les sulfates (SO_4^{-2})	77
d.	Nitrate (NO_3).....	77
5.5.7.	Les éléments mineurs	77
	Les nitrites (NO_2^-), L'azote ammoniacale (NH_4^+), Les phosphates (PO_4^-)	77
5.6.	Interprétation des analyses chimiques	77
5.6.1.	Diagramme de Piper.....	78
5.6.2.	Analyse en Composantes Principales (ACP)	82
5.7.	Conclusion	84
	Conclusion générale	86

Liste des figures

Figure 1 Situation géographique de la zone d'étude.	3
Figure 2 Variation des températures moyennes mensuelles.....	6
Figure 3 Valeurs de précipitations moyennes mensuelles.....	7
Figure 4 Valeurs de nébulosité mensuelle.....	8
Figure 5 Diagramme de l'humidité relative.....	9
Figure 6 Diagramme de l'évaporation dans la région d'Adrar.....	10
Figure 7 Valeurs ETP méthode Thornthwaite station d'Adrar.....	12
Figure 8 Position d'Adrar dans le diagramme d'Emberger (2010-2020).....	14
Figure 9 Délimitation du CI et CT en Algérie.....	18
Figure 10 Carte géologique du SASS.....	19
Figure 11 Coupe hydrogéologique Nord-Sud du Bassin Occidental.....	20
Figure 12 Exemple de logs lithologiques représentés sur une corrélation stratigraphique.....	20
Figure 13 Carte des épaisseurs du Continental Intercalaire.....	21
Figure 14 Carte piézométrique du CI 2007.....	22
Figure 15 L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer utilisé par les Romains.....	26
Figure 16 Vue aérienne d'un puits appartenant à L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer.....	26
Figure 17 Vue aérienne d'une série de puits de plusieurs qanât en Iran.....	27
Figure 18 Quelques vestiges des anciens qanats de Madrid.....	29
Figure 19 Vue aérienne des qanâts à Abraç Farzân.....	30
Figure 20 Trois qanats sur le versant nord de la colline Ayn-Manâwîr.....	31
Figure 21 Exemple d'Aflaj à Oman.....	32
Figure 22 Karez de Turpan Chine.....	32
Figure 23 Exemple de khettaras marocaines.....	33
Figure 24 Carte de situation de système de foggara ville d'Adrar –CDN Adrar.....	34
Figure 25 Système de fonctionnement de foggara.....	35
Figure 26 Vérification de pente entre l'amont et l'aval de.....	40
Figure 27 Méthode d'emplacement de <i>chekfa</i> durant les mesures.....	40
Figure 28 Forme de <i>chekfa</i> (\emptyset diamètre de l'orifice en mm et ; symboles sculptés sur la plaque).....	41
Figure 29 Organigramme présentant l'intégration des sept paramètres retenus par la méthode DRASTIC.....	48
Figure 30 Projection et situation des forages dans la zone d'étude.....	58
Figure 31 Carte des indices de la profondeur de la nappe CI.....	60

Figure 32 Carte de la recharge nette de la nappe CI.....	61
Figure 33 Carte thématique des indices du milieu aquifère CI.	63
Figure 34 Carte thématique des indices du type de sol.	64
Figure 35 Carte thématique des indices de la topographie de la région d'étude	66
Figure 36 Carte thématique des indices de l'impacte de zone vadose.	67
Figure 37 Carte thématique de l'indice de la conductivité hydraulique.....	69
Figure 38 Carte de l'indice de la vulnérabilité en utilisant la méthode DRASTIC dans la région d'étude.	70
Figure 39 Localisation des foggaras sur la carte d'indice de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC	72
Figure 40 carte de la vulnérabilité a la pollution des eaux souterraine par la méthode DRASTIC	73
Figure 41 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune d'Adrar (année 2011)	78
Figure 42 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Bouda (année 2011).	79
Figure 43 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Timi (année 2011).	80
Figure 44 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Tamentit (année 2011).	81
Figure 45 Diagramme de Piper des eaux de foggaras	82
Figure 46 Projection des variables sur le premier plan factoriel.	84

Liste des tableaux

Tableau 1 Valeurs des températures moyennes mensuelles (2010 – 2020) source ONM	6
Tableau 2 Valeurs de précipitations moyennes mensuelles (2010 – 2020) source ONM.....	7
Tableau 3 La nébulosité mensuelle du ciel couvert (2010 – 2020) source ONM	7
Tableau 4 Humidité relative moyenne mensuelle (2010 – 2020) source ONM.....	8
Tableau 5 Vitesse du vent.	9
Tableau 6 Evaporation dans la région d’Adrar (2010 – 2020) source ONM.....	10
Tableau 7 Calcul de l’ETP par la méthode de Thornthwaite à la station d’Adrar (Période : 2010 – 2020).....	11
Tableau 8 Bilan hydrique	12
Tableau 9 Donnée de base sur le système foggara région d’étude (année 2016).....	37
Tableau 10 Méthodes de vulnérabilité intrinsèque qualitative basées sur l'origine	44
Tableau 11 Paramètre et poids de la méthode DRASTIC.....	47
Tableau 12 Cote et poids de profondeur de la nappe phréatique	48
Tableau 13 Paramètre de la recharge nette. « RN »	49
Tableau 14 Paramètre du milieu aquifère. « A »	50
Tableau 15 Paramètre de nature du sol. « S »	50
Tableau 16 Paramètre de la Topographie. « T »	51
Tableau 17 Paramètre de l’impact de la zone Vadose « I »	52
Tableau 18 Paramètre de conductivité hydraulique « C »	53
Tableau 19 Critère de la vulnérabilité à la pollution de la méthode DRASTIC	53
Tableau 20 Valeurs expérimentales des débits en ml/s.....	56
Tableau 21 Classes et pondération du paramètres de profondeur de nappe.....	59
Tableau 22 Classes et pondération du paramètre de recharge nette.....	61
Tableau 23 Classes et pondération du paramètre de milieu aquifère	62
Tableau 24 Classes et pondération du paramètre de milieu aquifère	62
Tableau 25 Classes et pondération du paramètre de la topographie.....	65
Tableau 26 Classes et pondération de la nature de zone vadose	65
Tableau 27 Valeurs de la conductivité hydraulique pour la région d’étude.....	68
Tableau 28 Plage des valeurs de température des échantillons d'eau de foggara , prélevés en Avril 2019.....	74
Tableau 29 Gamme des valeurs de pH des échantillons d'eaux souterraines pour les deux saisons humides et sèches (année 2019).....	74

Tableau 30 Gamme des valeurs de TDS en mg/l des échantillons d'eaux souterraines pour les saisons humides et sèches (année 2019).....	75
Tableau 31 Matrice des corrélations entre les 10 variables retenues	83
Tableau 32 Variance totale expliqué (valeurs propres).....	83

Liste des abréviations.

AEP	Alimentation en Eau Potable.
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
CI	Continental Intercalaire.
CT	Complexe Terminal.
DRE	Direction des Ressources en Eau.
DSA	Direction des Services Agricoles.
OF	Observatoire de la Foggara.
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel.
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture.
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional.
OMS	Organisation Mondial de la Santé.
ACP	Analyse en Composante Principale.
BD	Base des données.
EX:	Excédent.
RFU	Réserve facile utilisable.
ETR	Evapotranspiration réelle.
ETP	Evapotranspiration potentielle.

Introduction générale

Les eaux souterraines constituent une ressource cruciale dans de nombreux pays et plus particulièrement dans les zones arides et semi-arides [1]. Plus d'un milliard de personnes dans le monde n'ont pas un accès à l'eau potable et près de deux milliards et demi, soit le tiers de la population mondiale, seront confrontés à une pénurie d'eau [2, 3].

En Afrique, les eaux souterraines subissent de multiples contraintes dues à une forte croissance démographique et à l'inadaptation ou même à l'absence d'assainissement.[4]. Les réseaux d'égouts, les fosses septiques, les eaux usées des usines et les déchets solides sont les sources principales de pollution des eaux souterraines dans le secteur urbain ; dans les zones périurbaines, l'agriculture, via les intrants agricoles, contribue aussi à dégrader la qualité des nappes phréatiques.

Au Sud de l'Algérie, les précipitations sont pratiquement inexistantes. Les agriculteurs de ces régions désertiques utilisent la méthode d'irrigation millénaire appropriée à leurs cultures par le biais du système de foggara. Ce système qui consiste à apporter de l'eau à ces-cultures par écoulement gravitaire, à partir d'une source souvent très éloignée de l'agglomération populaire « *ksar* » en traversant des galeries souterraines jusqu'au réservoir de stockage « *madjane* »[5].

L'établissement d'une foggara est essentiellement une œuvre collective. Il est extrêmement rare et tout à fait anormal qu'une foggara soit la propriété d'un seul individu. Chacune d'elle appartient à un groupe de propriétaires. Ce régime de la copropriété pose le problème de la répartition de l'eau. La façon dont s'opère cette répartition n'est pas d'une moindre originalité que le procédé de captage lui-même.

Face aux transformations sociales, économiques et environnementales remarquées durant les dernières décennies dans notre région d'étude, l'eau du système de foggara est peut subir à une vulnérabilité directe à la pollution, et par conséquent la durabilité de ce système est mise en danger.

Dans le cadre de la stratégie globale de maîtrise, de mobilisation et de protection des ressources en eau dans la wilaya d'Adrar (Adrar chef lieu, Tamentit, Bouda et Ouled Ahmed) région géographique, dans laquelle l'existence, mais surtout la subsistance de l'utilisation d'innombrables foggaras à différents usages (irrigation, alimentation en eau potable et usage domestique). Il a paru opportun d'étudier le système de la foggara en deux aspects :

Dans un premier temps, une évaluation des instruments de mesure des quantités d'eau réparties aux différents usagés en fin d'irrigation de l'oasis Tamentit, et cela, par

benchmarking d'instruments de mesure de la région de Timimoun. Il s'agit en fait de l'étude de l'instrument *chekfa* qui est utilisé sous différentes formes.

Dans un deuxième temps, une étude qualitative basée sur la détermination de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines des foggaras sera entreprise via la méthode DRASTIC.

Pour ce faire, le travail sera déroulé en cinq chapitres :

Le premier présentera les caractéristiques générales de la géographie, climatologie géomorphologie de la région.

Le deuxième chapitre sera consacré au contexte hydrogéologique de la région d'étude. Il puisera notamment les connaissances issues des travaux du SASS afin d'identifier les caractéristiques de la nappe du continental intercalaire, réservoir d'alimentation des foggaras de la région d'étude.

Le troisième chapitre exposera le contexte de l'histoire du système foggara à travers le monde, l'importance du système pour le développement agricole et industriel. Et sera illustré par la description de la méthode de gestion et distribution de ressources en eau par ce système dans la région d'Adrar.

Le quatrième chapitre traitera les matériels et méthodes nécessaires pour réaliser ce travail. Il examinera l'instrument de mesure de débit (*chekfa*), ses caractéristiques et son mode de fonctionnement. Il déclinera les paramètres recommandés pour l'application de la méthode DRASTIC afin d'évaluer la vulnérabilité à la pollution des eaux de foggaras.

Enfin, le cinquième chapitre présente les principaux résultats obtenus suivis de leurs interprétations.

Le travail sera clôturé par une conclusion générale liée à cette étude.

1.1.Introduction

Dans ce chapitre, on présente les données climatiques et morphologiques de notre zone d'étude, l'intérêt du chapitre est de fixer les rapports entre la géographie de la zone étudiée et son climat.

L'étude des paramètres hydro climatique nécessite un traitement détaillé des observations hydroclimatologiques. Tels que les précipitations, la température, l'évapotranspiration et le ruissellement [6].

1.2.Situation géographique

La zone d'étude – wilaya d'Adrar- est située à environ 1 500 km au Sud-Ouest de la capitale d'Alger (figure 1); cette wilaya couvre une superficie de 525 270 km² soit 1/5 du territoire national. Elle est limitée administrativement au nord par la wilaya d'El-bayadh au nord- ouest, par la wilaya de Bechar, à l'Ouest par la wilaya de Tindouf, au sud par la wilaya de Tamanrasset, et enfin au sud et au Sud-Ouest respectivement au Mali et à la Mauritanie.la région d'étude est comprise entre les coordonnées géographiques suivantes latitude de 0° 30 'O à 0° 30' E et la longitude 26° 30 'N à 28° 00 N avec une altitude de 280 m au-dessus de la mer Méditerranée. Ses frontières naturelles sont le plus grand erg occidental au nord, l'erg Echech à l'ouest, le Sahara Tanezrouft au sud et le plateau Tademaït à l'est [7].

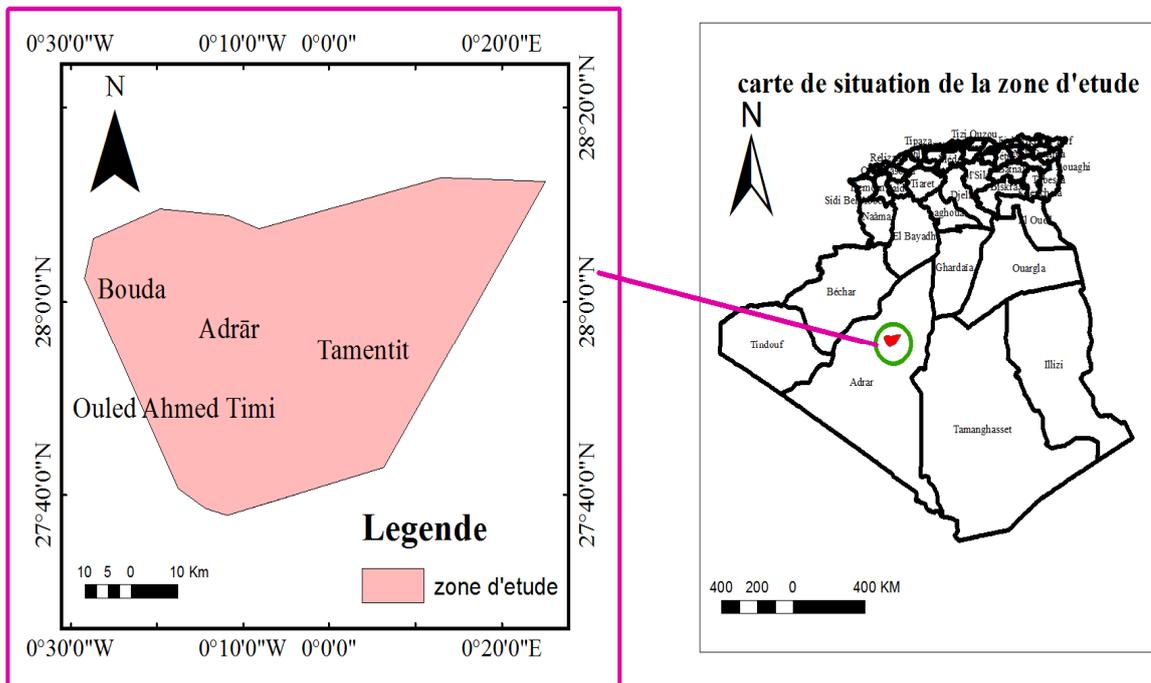


Figure 1 Situation géographique de la zone d'étude.

1.3.Aspect géomorphologique

La zone d'étude fait partie d'une grande zone allongée d'Est en Ouest et présente certains traits morphologiques à savoir :

1.3.1. Le plateau

Il limite notre région d'étude en Est, sa formation est tubulaire rocheuse. Il se caractérise par une faible pente (environ 0.2) et une altitude qui dépasse les 300 m [8].

1.3.2. La dépression

Nommée Sebkhah; elle se trouve généralement en aval des palmeraies. Elle se caractérise par sa forte salinité.

Elle est située généralement dans les dépressions. Elle était constituée au cours des époques géologiques anciennes pendant les périodes pluvieuses [9].

1.3.3. Erg

La sédimentation et l'accumulation des couches sableuses constituent l'erg . Cette accumulation est peut se faire soit artificiellement qui justifiait la présence des petits ergs dispersés tout le long de notre région d'étude, ou naturellement par la formation de l'erg Echeche au Nord et le grand erg occidental à l'Ouest.

1.3.4. Reg

Le reg peut se considérer comme le type morphologique le plus fréquent dans la région. Il est représenté par une surface sensiblement horizontale, recouverte de débris généralement graveleux ou caillouteux d'âge quaternaire qui protègent un substrat en général sableux ou alluvial de texture plus fine et d'âge crétacé inférieur [10].

1.4. Aspect socioéconomique

1.4.1. Agriculture

La région d'Adrar fait partie de la zone la plus aride dans le monde; en revanche elle a connu ces dernières années un développement considérable dans le domaine agricole sous l'impulsion subventionnée de l'état. Cette bonification étatique, a transformé l'agriculteur oasien traditionnel vers les périmètres de mise en valeur.

Des milliers d'hectares sont cultivés par la palmeraie (culture dominante) pour une production des multiples variétés de dattes. Les autres cultures sont produites aussi en quantités variables principalement sous forme de céréales et de maraichers.

1.4.2. Elevage

L'inexistence du couvert végétale dans notre zone d'étude liée à son extrême aridité. Fais que le développement de l'élevage est considéré comme un problème épineux nécessitant des moyens considérables pour en faire une activité rentable.

Les espèces animales élevées dans les régions sahariennes sont : les camelins (en prépondérance), les caprins, les ovins et les bovins.

1.4.3. Industrie

Adrar a connu un saut qualitatif dans le domaine pétrolier. En effet, plusieurs champs gaziers et pétroliers ont été explorés et exploités. Cette activité a été implantée dans une durée temps très court afin de répondre à la politique générale de pays. Ces dernières années, l'Algérie a été s'orienter vers les énergies renouvelables et plusieurs industries dans ce domaine ont été développées dans la wilaya d'Adrar.

1.4.4. Tourisme

La valeur touristique de la zone d'étude a été mentionnée depuis le passage d'illustres visiteurs par les visiteurs spéciaux comme Iben Khaldoun et Ibn Batouta qui ont décrit les sites touristiques distribués tout le long de la wilaya Adrar. Le tourisme a été développé notamment grâce au commerçant, ceux qui exerçaient leurs activités commerciales entre l'Algérie et les pays africains limitrophes comme le Mali et le Niger a titre exemple.

1.5. Etude climatologique

L'étude climatologique a une importance considérable dans la description d'une région. la connaissance des facteurs climatiques telle que la température, le vent, l'humidité... etc nous permettent de contrôler le mouvement de l'eau de surface et de ces eaux souterraines (foggaras) qui font l'objet de cette étude.

Notre région d'étude est caractérisée par un climat très sec dont les températures sont très élevées en été et les précipitations sont très faibles.

1.5.1. Température

La température est un élément fondamental du climat, sa variation influe sur la transformation de l'eau en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous- sol, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent, elle agit sur le taux de salinité des eaux.

Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique, c'est un facteur principal qui conditionne le climat de la région. L'analyse des températures sera faite à partir des données de la station météorologique Adrar pour la période allant de 2010 à 2020 [11].

1.4.2.1 Températures moyennes mensuelles

Les valeurs moyennes enregistrées pour la période 2010 – 2020 sont représentées dans le Tableau 1

Tableau 1 Valeurs des températures moyennes mensuelles (2010 – 2020) source ONM

mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Moy
T°c	33,4	27,1	19,6	14,1	13,4	16,1	20,9	26,7	31,5	35,9	38,7	37,5	26,23

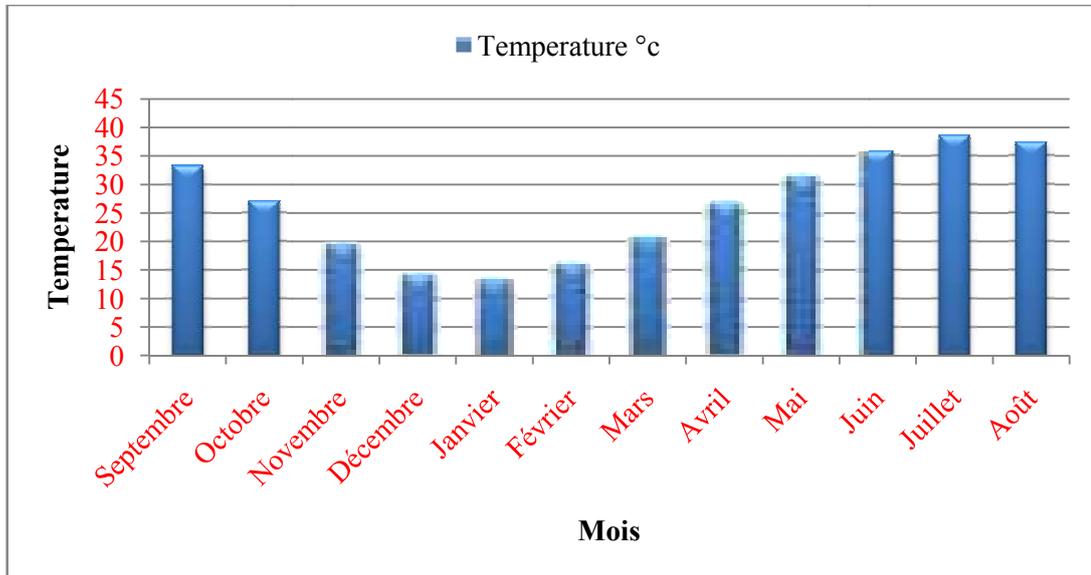


Figure 2 Variation des températures moyennes mensuelles

A partir de figure 2, on remarque que les moyennes mensuelles de la température sont plus élevées pendant la période d'été (juin- septembre) avec des températures variantes de 31,5 à 38,7 °C. Par contre les températures les plus basses, de à, sont observées pendant la période des mois décembre (14,1 °C) et janvier (13,4 °C). Les autres mois présentent des températures intermédiaires de 16,1 à 27,1 °C.

Les valeurs élevées de la température moyenne mensuelle nous indiquent que pendant la période d'été, vont produire une évaporation de l'eau et en même temps qu'une augmentation de la salinité des eaux de foggara [11].

1.5.2. Précipitation

Les régions sahariennes sont caractérisées par la rareté de la précipitation durant l'année entière ce qui influe directement sur la gestion des ressources en eau.

➤ *Précipitations moyennes mensuelles*

L'importance de la précipitation moyenne mensuelle est de déterminer l'infiltration et la recharge des nappes qui font l'objet de l'alimentation du système de foggaras.

L'analyse des valeurs enregistrées dans la station météorologique Adrar (Tableau 2), montre que la précipitation moyenne mensuelle a une valeur maximale au mois de novembre (1,9

mm) et par conséquent la saison hivernale est la plus pluvieuse dont les températures sont les plus baissées ce qui produira une évaporation lente.

Tableau 2 Valeurs de précipitations moyennes mensuelles (2010 – 2020) source ONM

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Moy
P(mm)	1,2	1,4	1,9	0,8	1,1	1,7	1,6	0,5	0,9	0,9	0,6	0,4	13

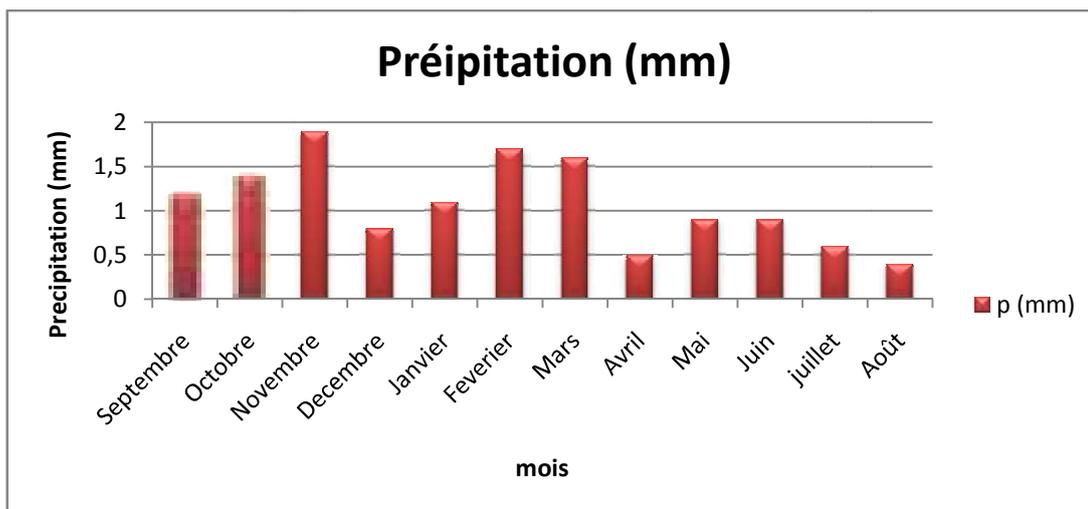


Figure 3 Valeurs de précipitations moyennes mensuelles

1.5.3. La nébulosité

La nébulosité est une fraction du ciel qui est couvert par les nuages; c'est la promesse apparente de pluie [12]. Les donnes météorologiques indiquent que pour le territoire d'Adrar les valeurs moyennes mensuelles sont comprises entre 0,1 et 0,3.

Tableau 3 La nébulosité mensuelle du ciel couvert (2010 – 2020) source ONM

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avri	Mai	Jui	Juil	Août
nébulosité	0,12	0,2	0,29	0,30	0,31	0,30	0,28	0,15	0,17	0,13	0,10	0,10

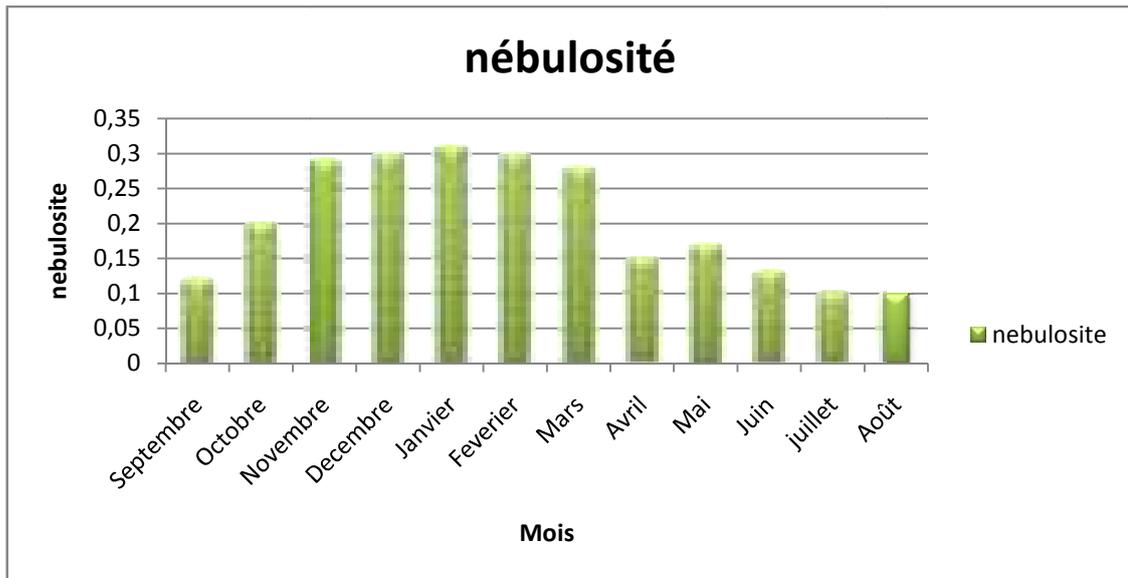


Figure 4 Valeurs de nébulosité mensuelle

1.5.4. L'humidité

Le paramètre humidité désigne en météorologie la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. En météorologie, on quantifie l'humidité de l'air de deux manières : l'humidité absolue et l'humidité relative.

1.5.4.1. L'humidité absolue

L'humidité absolue désigne la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Elle s'exprime en grammes d'eau par mètre cube d'air (g/m^3). Cette quantité est invariante, elle n'est pas soumise aux variations de la température. En effet, l'air est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau et un mètre cube d'air contient toujours quelques grammes de vapeur d'eau.

1.5.4.2. L'humidité relative

L'humidité relative est le rapport de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la quantité de vapeur d'eau maximale possible. L'humidité relative s'exprime en pourcentage. 100 % correspond à un air saturé en vapeur d'eau (risque de nuage, pluie, brouillard, rosée ou givre), 0 % à un air parfaitement sec (cette valeur d'humidité relative n'est jamais atteinte dans la nature, pas même dans les déserts).

Tableau 4 Humidité relative moyenne mensuelle (2010 – 2020) source ONM

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avrl	Mai	Jui	Juil	Aou
HR(%)	21,9	29,6	34,4	39,1	36,0	28,0	22,5	20,1	17,2	14,0	12,7	11,2

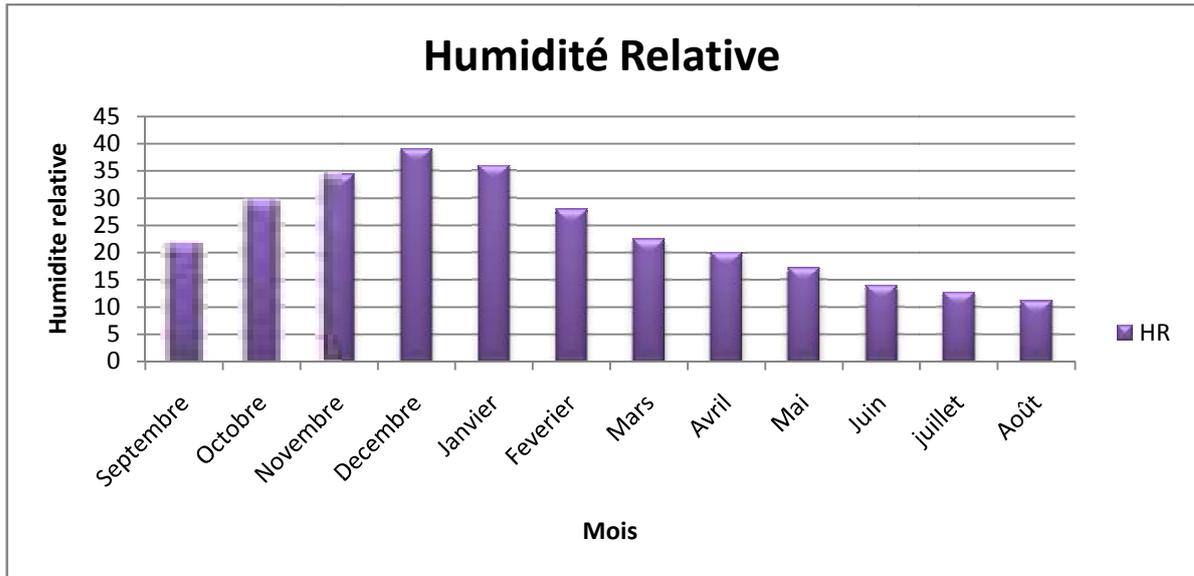


Figure 5 Diagramme de l'humidité relative.

D'après la figure 5, on remarque que l'humidité de l'air augmente dans la période d'hiver pour une valeur maximale 39,1 % pendant le mois de décembre. Et elle diminue dans la période d'été à une valeur minimale 12,7 % durant le mois de juillet ce qui provoque une intense évapotranspiration signe de sécheresse accentuée.

1.5.5. Les vents

La région d' Adrar est l'une des régions la plus ventée du Sahara avec des vents particulièrement violents. Le tableau 5 représente les moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistrées durant la période de 2010 à 2020.

Tableau 5 Vitesse du vent.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
Vitesse(m/s)	5,6	5,5	5,3	4,8	5,7	5,6	6,6	6,3	6,0	5,5	5,8	5,6

Les valeurs des vents dépassent parfois les 75 km/h pendant la période du printemps (entre février et avril). La direction du vent est souvent de Nord-Est en hiver et Sud-Ouest en été.

1.5.6. L'évaporation

L'évaporation traduit le retour de l'eau à l'atmosphère sous forme de vapeur, elle intéresse aussi bien les surfaces d'eau libre que les quantités d'eau retenue dans les couches plus profondes. Le tableau 6 présente l'évaporation enregistrée pendant la période entre 2010 et 2020.

Tableau 6 Evaporation dans la région d'Adrar (2010 – 2020) source ONM

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
L'évaporation (mm)	504	354	248	194	206	241	339	425	560	570	638	616

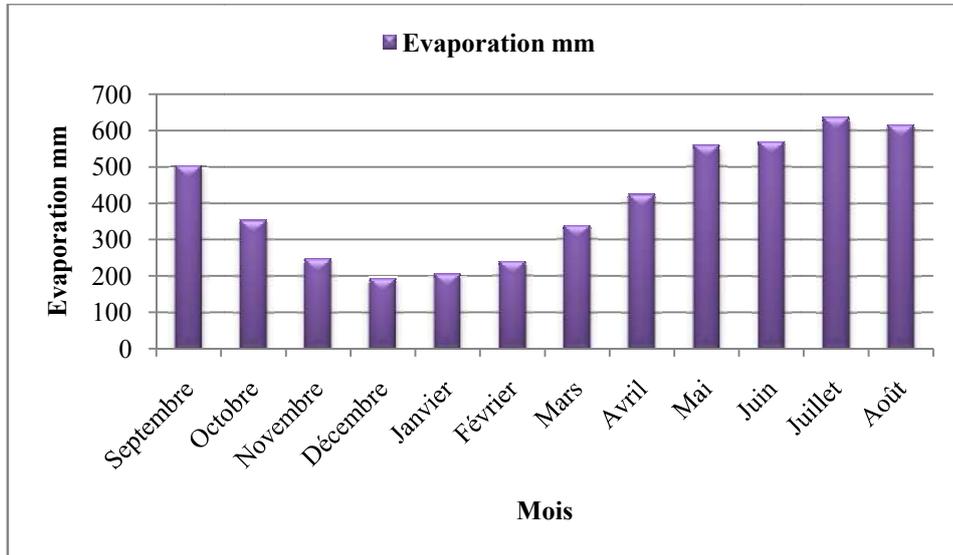


Figure 6 Diagramme de l'évaporation dans la région d'Adrar.

Le diagramme (figure 6) montre que l'évaporation est maximale dans la période d'été, la valeur maximale (638 mm) a été enregistré au mois de juillet.

1.5.7. L'évapotranspiration

C'est un paramètre essentiel, car il présente une partie de la fonction de sortie dans le bilan hydrologique d'une région. Cependant, il est difficile à mesurer, car il dépend de plusieurs facteurs qui sont variables dans l'espace et dans le temps, tels que la température, les précipitations, l'état du sol et la végétation.

Le calcul de la valeur de l'évapotranspiration réelle et potentielle est fait par la loi de Thornthwaite [11].

a) Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la formule de Thornthwaite

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évaporation d'une surface, qui serait suffisamment approvisionnée en eau, pour évaporer la quantité d'eau maximale, permise par les conditions climatiques et physiologiques.

La formule de Thornthwaite est donnée par :

$$ETP = k \cdot 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_{moy}}{I} \right)^a, \quad 0^\circ\text{C} \leq T_{moy} \leq 26.5^\circ\text{C} \quad (1.1)$$

$$ETP = k \cdot (-0.43 \cdot T_{moy}^2 + 32.24 \cdot T_{moy} - 415.85), \quad T_{moy} > 26.5^\circ\text{C} \quad (1.2)$$

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad \text{et} \quad i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (1.3)$$

$$a = \left(\frac{1,6}{100} \times I\right) + 0,5 \quad (1.4)$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

k : Coefficient d'ajustement mensuel en fonction de la latitude et de la durée du jour.

T : la température moyenne mensuelle (°C).

I : indice thermique annuel.

i : indice thermique mensuel

a : constante fonction de l'indice thermique annuel : [11, 13, 14] .

Tableau 7 Calcul de l'ETP par la méthode de Thornthwaite à la station d'Adrar (latitude 27° 82' N) (Période : 2010 – 2020)

mois	Sep	Oct	No	Dé	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Année
P(mm)	1,2	1,4	1,9	0,8	1,1	1,7	1,6	0,5	0,9	0,9	0,6	0,4	13
T (C°)	33,4	27,1	19,6	14,1	13,4	16,1	20,9	26,7	31,5	35,9	38,7	37,5	314,9
i	17,73	12,92	7,91	4,80	4,45	5,87	8,72	12,63	16,23	19,78	22,25	21,13	154,42
k	1,02	0,99	0,9	0,9	0,92	0,88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	-
ETP (mm)	184,90	140,64	29,24	10,99	9,66	15,94	40,49	148,10	200,73	215,48	221,51	212,96	1430,65

A partir du tableau 7, on remarque que :

L'évapotranspiration potentielle calculée à la station d'Adrar pour la période 2010– 2020, par la méthode de Thornthwaite, est d'environ 1430,65 mm. Cette valeur est très grande que la valeur de la précipitation moyenne cela se signifie que les valeurs de l'évaporation réelle sont égales aux valeurs de la précipitation (ETR=P) en mm

Les valeurs moyennes mensuelles d'ETP oscillent entre 10,99 mm et 221,51 mm respectivement aux mois de décembre et juillet (figure 7).

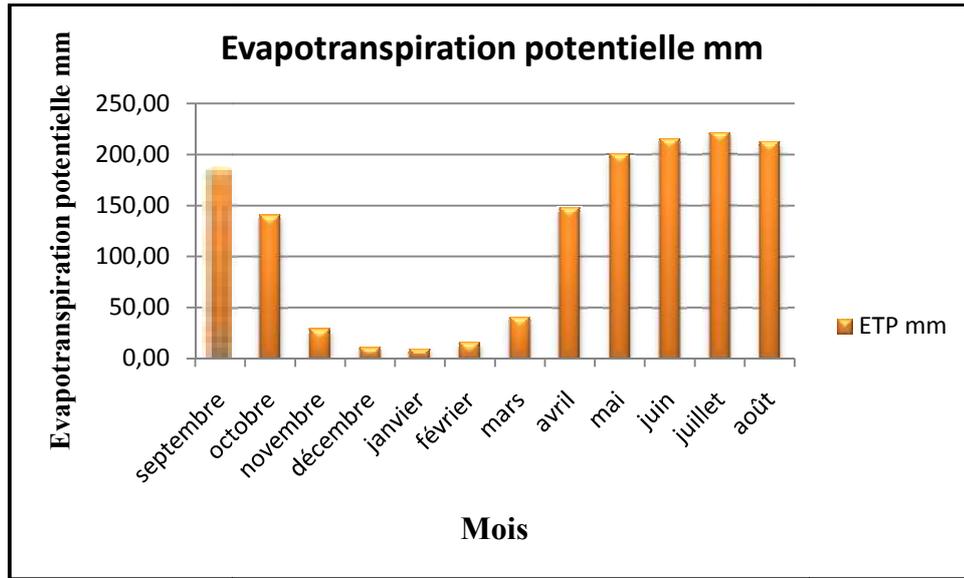


Figure 7 Valeurs ETP méthode Thornthwaite station d'Adrar.

1.5.8. Bilan hydrique par la méthode Thornthwaite

Le bilan hydrique traduit la suite des différentes phases du phénomène météorologique aqueux (pluie, neige, grêle) atteignant le sol, avant de rebrousser chemin vers l'atmosphère. L'estimation du bilan hydrologique naturel peut se faire par l'application de la formule suivante :

$$P = ETR + EX \quad (1.5)$$

Ou :

P : Précipitations annuelles (mm), ETR : Évapotranspiration réelle annuelle (mm).

EX : Excédent, EX = I + R ou R : Ruissellement (mm), I : Infiltration (mm).

Tableau 8 Bilan hydrique

mois	Sep	Oct	No	Dé	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Année
P(mm)	1,2	1,4	1,9	0,8	1,1	1,7	1,6	0,5	0,9	0,9	0,6	0,4	13
ETP (mm)	184,90	140,64	29,24	10,99	9,66	15,94	40,49	148,10	200,73	215,48	221,51	212,96	1430,65
P-ETP	-183,7	-139,24	-27,34	-10,19	-8,56	-14,24	-38,89	-147,6	-199,83	-214,58	-220,91	-212,56	-1417,65
RFU	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETR (mm)	1,2	1,4	1,9	0,8	1,1	1,7	1,6	0,5	0,9	0,9	0,6	0,4	13
EX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

La réserve facilement utilisable dans notre région d'étude est nulle. Le bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite (tableau 8) présente un résultat déficitaire pendant toute

l'année, car l'excédent est nul durant toutes les saisons de l'année, d'où l'alimentation de l'aquifère est nulle.

1.5.9. Quotien pluviométrique d'Emberger

Cet indice permet de déterminer l'étage bioclimatique de la zone d'étude, deux paramètres sont pris en considération :

- La pluviométrie moyenne annuelle (P) ;
- La température : La moyenne des maxima du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minima du mois le plus froid (m).

La formule d'Emberger est la suivante :

$$Q_2 = 2000 P / (M^2 - m^2)$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (en mm).

m : moyenne des minima du mois le plus froid (en Kelvin).

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (en Kelvin).

$$T (^{\circ}\text{K}) = T (^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

Pour la région d'Adrar :

$$m = 14,1 + 273,15 = 287,25 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$M = 38,8 + 273,15 = 661,15 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$P = 13,1 \text{ mm.}$$

La température minimale enregistrée pendant le mois de janvier au cours des 10 ans dans cette station est 10,6.

Donc: $Q_2 = 0,07$, la région d'Adrar est située dans l'étage bioclimatique saharienne à selon le climagramme d'Emberger (figure 8).

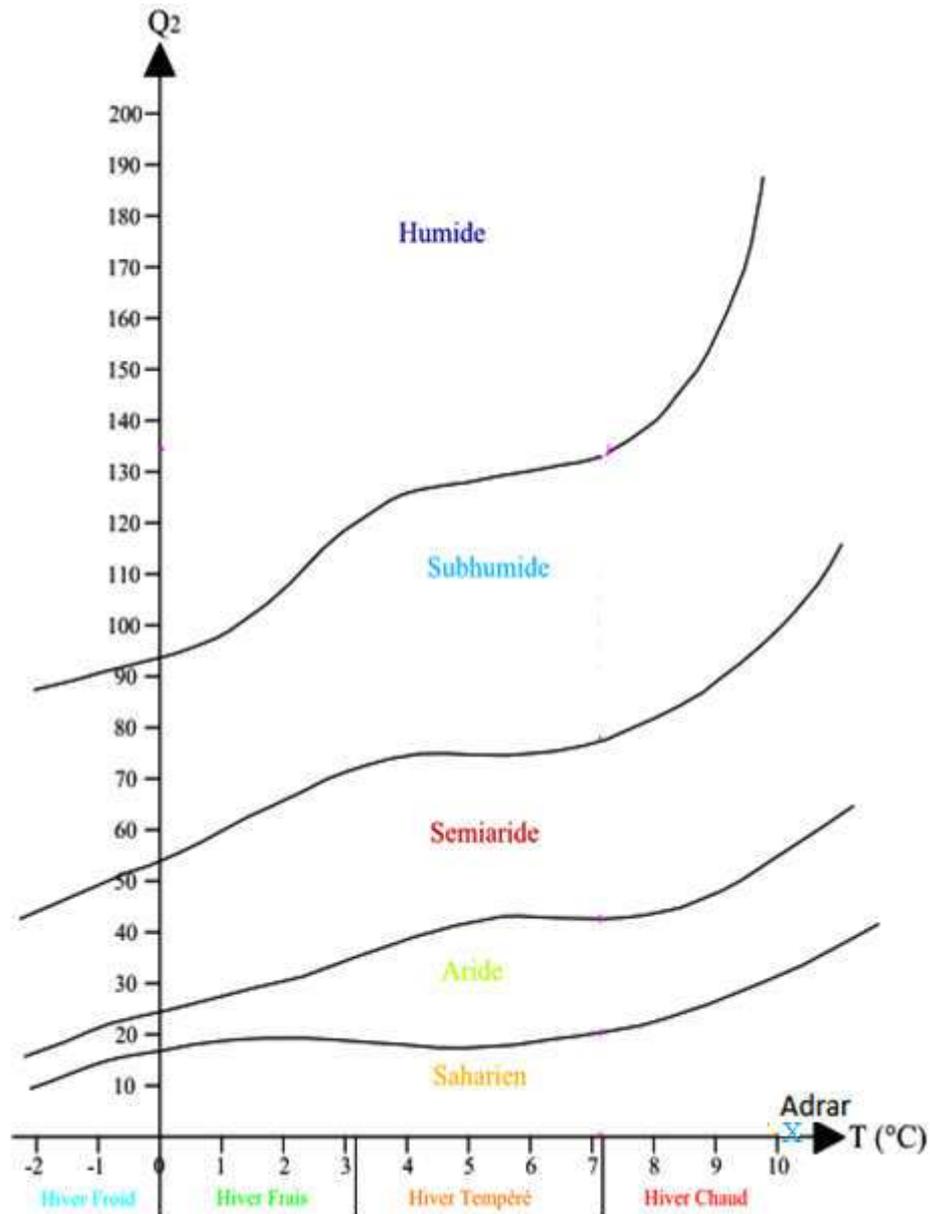


Figure 8 Position d'Adrar dans le diagramme d'Emberger (2010-2020).

1.5.10. Indice de Martone

L'indice d'aridité de Martonne, noté I, cet indice permet de déterminer le degré d'aridité d'une région [15, 16]. Cet indice d'aridité est exprimé par la formule suivante :

$$I = P / (T + 10) \quad (1.6)$$

Avec

P : la précipitation moyenne annuelle.

T : la température moyenne annuelle.

Suivant les valeurs de I obtenues par de Martonne (1923), on a établi la classification suivante

:

- ✚ $I < 5$ = climat hyper aride
- ✚ $5 < I < 7.5$ = climat désertique
- ✚ $7.5 < I < 10$ = climat steppique
- ✚ $10 < I < 20$ = climat semi aride
- ✚ $20 < I < 30$ = climat tempéré

Pour la région d'Adrar la précipitation moyenne annuelle est de 13 mm tandis que la température moyenne annuelle est de 26,25. Après le calcul numérique, on trouve que $I=0,36$, il est inférieur à 5, donc cette région est soumise à un climat hyper aride.

1.6. Conclusion

La zone d'étude fait partie d'une grande zone allongée d'Est en Ouest et présente certains traits morphologiques à savoir : le plateau, la dépression et l'erg.

Le digramme d'Emberger et l'indice de Martonne ont montré que notre zone est appartenue aux zones arides dont les précipitations sont très rares, les valeurs des températures sont élevées sur tout en été, la pluviométrie est faible (13 mm) qu'explique la pauvreté en couverture végétale.

le bilan hydrique calculé pour la région d'Adrar selon la méthode de Thornthwaite est déficitaire avec une valeur importante liée à l'évapotranspiration potentielle très élevée (1430,65 mm) et aux pluies insignifiantes enregistrées.

chapitre 2 Etude hydrogéologique de la zone d'étude

2.1. Introduction

Le système aquifère du Sahara septentrional désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes: la formation du continental intercalaire, CI, et celle du complexe terminal, CT. Ce système recouvre une étendue de plus d'un Million de km².

2.2. System aquifères (SASS)

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie (60 % de sa superficie), en Libye (30 %) et en Tunisie (10 %) [17] (ce bassin renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT) [18].

Le Complexe Terminal est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du crétacé supérieur et des épisodes détritiques du tertiaire et principalement du Miocène. Ces définitions ont été adoptées, à l'origine, pour analyser et schématiser, en vue de la modélisation, du fonctionnement hydrodynamique des aquifères Algériens puis par extension, Tunisiens. Avec le projet SASS, l'ajout à l'étude du bassin saharien libyen a demandé une nouvelle analyse des informations géologiques, géophysiques et hydrogéologiques, se basant à la fois, sur les études antérieures et sur la collecte de données nouvelles [18].

Le domaine du SASS couvre une superficie d'environ un million de km² et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tinrhert, et d'Ouest en Est depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye [18].

Le bassin du SASS se subdivise en trois sous bassins : le bassin du Grand Erg Occidental à l'Ouest, le bassin du Grand Erg Oriental au centre et le plateau de la Hamada El Hamra à l'Est [18, 19].

La région d'étude (Adrar) fait partie du bassin du Grand l'Erg Occidental (figure 9), qui est une entité géographique où la nappe du continental intercalaire est en majeure partie libre et elle constitue de ce fait, une réserve en eau souterraine facilement accessible à l'aide d'ouvrages (Foggaras, puits et forages) de faible profondeur (quelques dizaines de mètres) [18].

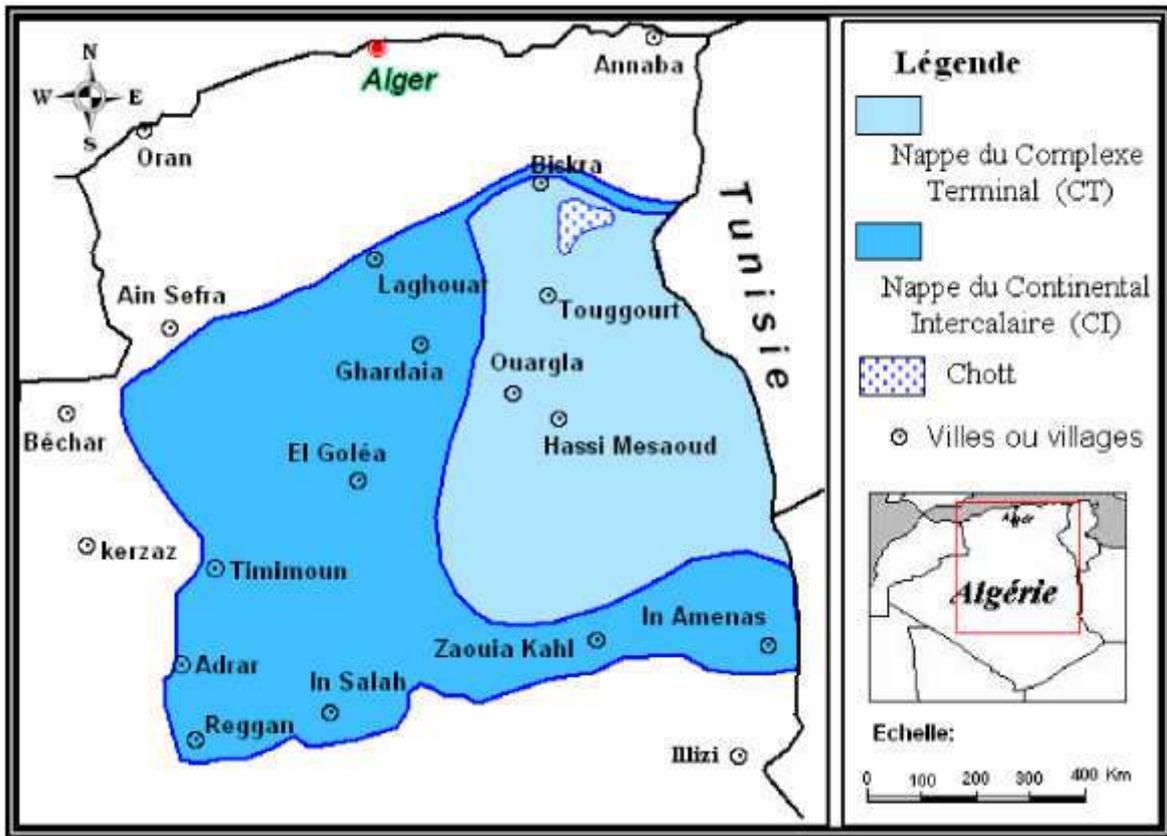


Figure 9 Délimitation du CI et CT en Algérie [18].

2.3. Continental intercalaire (CI)

De point de vue géologique et selon Kilian 1932, le terme du Continental intercalaire désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins :

- à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne,
- au sommet, le cycle du Crétacé supérieur [18].

La formation du continental intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 1000 m. Il s'affleure au Nord-Ouest tout au long de l'atlas Saharien et au Nord-Est sur le Dahar et le Djebel Neffusa. Au Sud, il affleure le long des formations sédimentaires du Paléozoïque.[17].

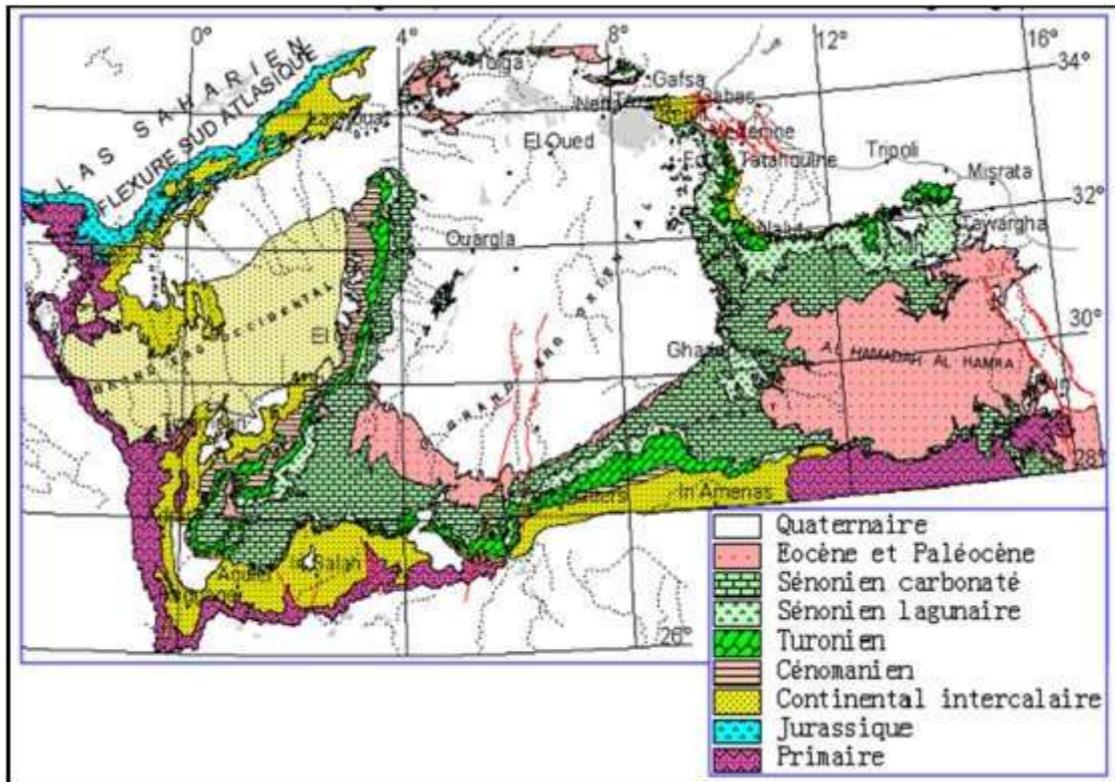


Figure 10 Carte géologique du SASS [18].

De point de vue hydrogéologique le continental intercalaire (la nappe d'Albian) s'étend sur tout le Sahara septentrional, il constitue un relais entre le bassin oriental et occidental. C'est un système multicouche qui s'étend sur une superficie estimée théoriquement à 600 000 km², soit un volume important d'eau estimé 3,5 10⁹ Milliards de m³[20].

Les travaux géologiques réalisés dans la zone d'étude ont montré que la nappe du Continental Intercalaire affleure dans la partie Sud Ouest du bassin et qu'elle repose directement sur des formations paléozoïques, ainsi que son plongement vers l'Est sous la couverture du crétacé supérieur, vers le Nord, le Continental Intercalaire affleure jusqu'à la limite des dépôts quaternaires de l'Erg Occidental où il est recouvert par les dunes de l'Erg.

D'autres travaux montrent que le Continental Intercalaire plonge du Nord vers l'Est sous le Complexe Terminal (figure 10,11)[19].

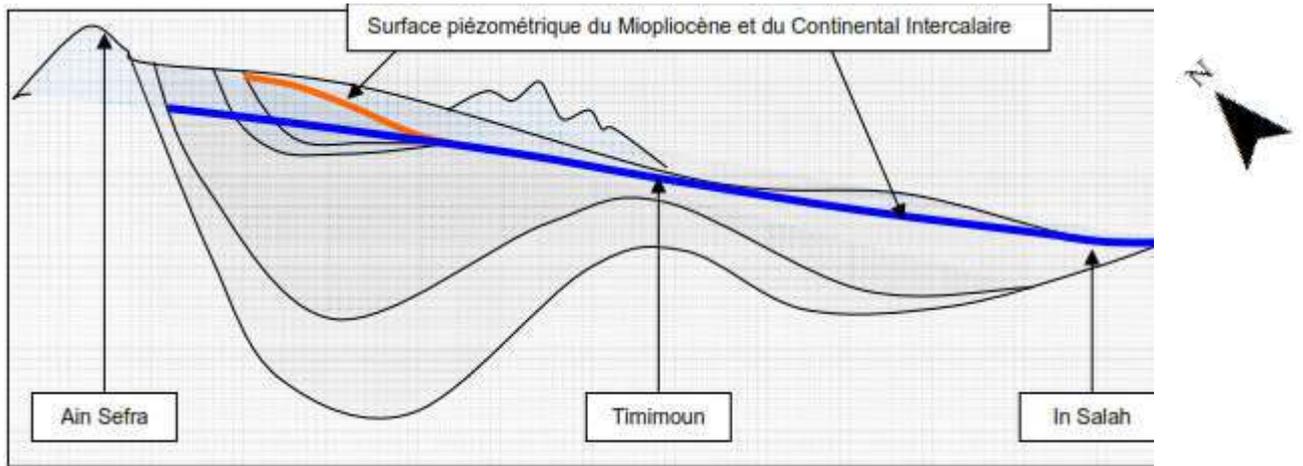


Figure 11 Coupe hydrogéologique Nord-Sud du Bassin Occidental [21]

2.4. Caractéristiques principales du CI

2.4.1. Lithologie de la nappe du Continental Intercalaire

La synthèse des travaux réalisés par le SASS, la SONATRACH ainsi que les forages implantés dans notre zone d'étude montre des coupes lithologiques composés en haut vers le bas par :

- Une dalle très dure de calcaire ou de calcaire dolomitique, ou de grès quartzitique ;
- Une couche gréseuse et argileuse et argile multicolore ;
- Une couche de sable et de gravier ;
- Une couche d'argile sableuse avec gypse ou anhydrite ;
- Une couche d'argile rouge ou marron plastique (figure 12) [22].

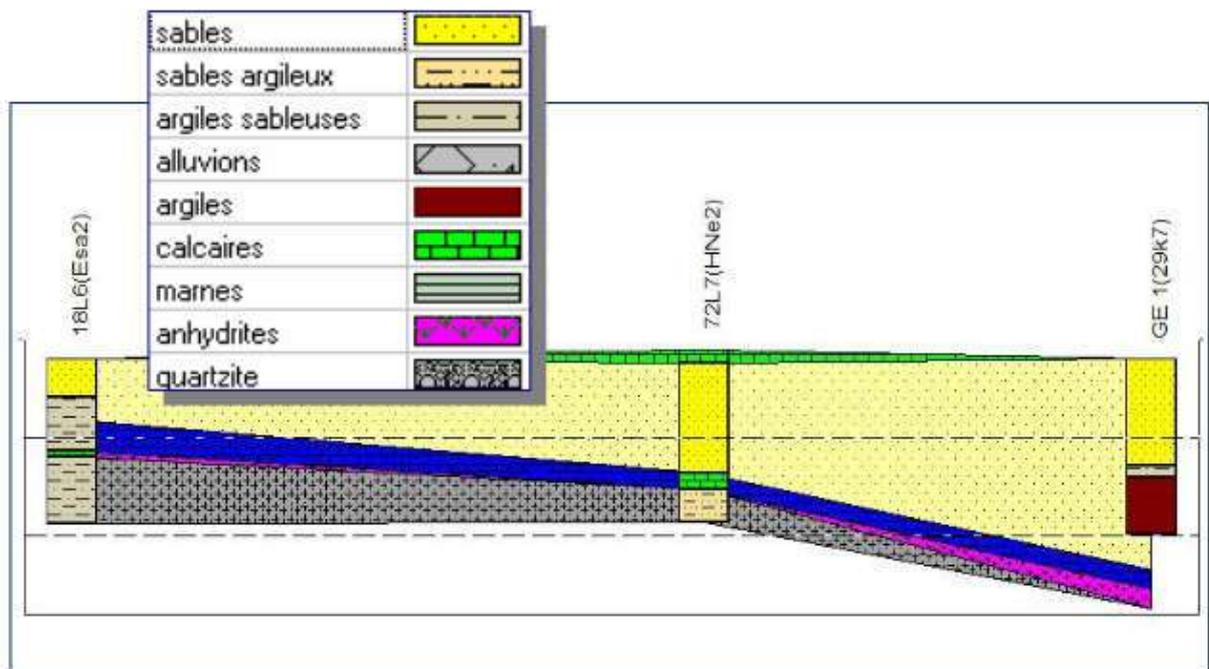


Figure 12 Exemple de logs lithologiques représentés sur une corrélation stratigraphique [21]

2.4.2. Epaisseur saturée du (CI)

Le niveau statique de la nappe aquifère du continental intercalaire (CI) oscille entre 50 à 2000 m par rapport à la côte de la surface du sol et peut atteindre 10 m au niveau du plateau de Tademaït (forage Ain Bel bel).

L'exploitation des logs de forages a également permis d'établir la carte épaisseurs saturées du continental intercalaire (figure 13). Cette carte permet de définir des indices pour guider l'implantation de forages de reconnaissance et éprouver les meilleures capacités de l'aquifère [21].

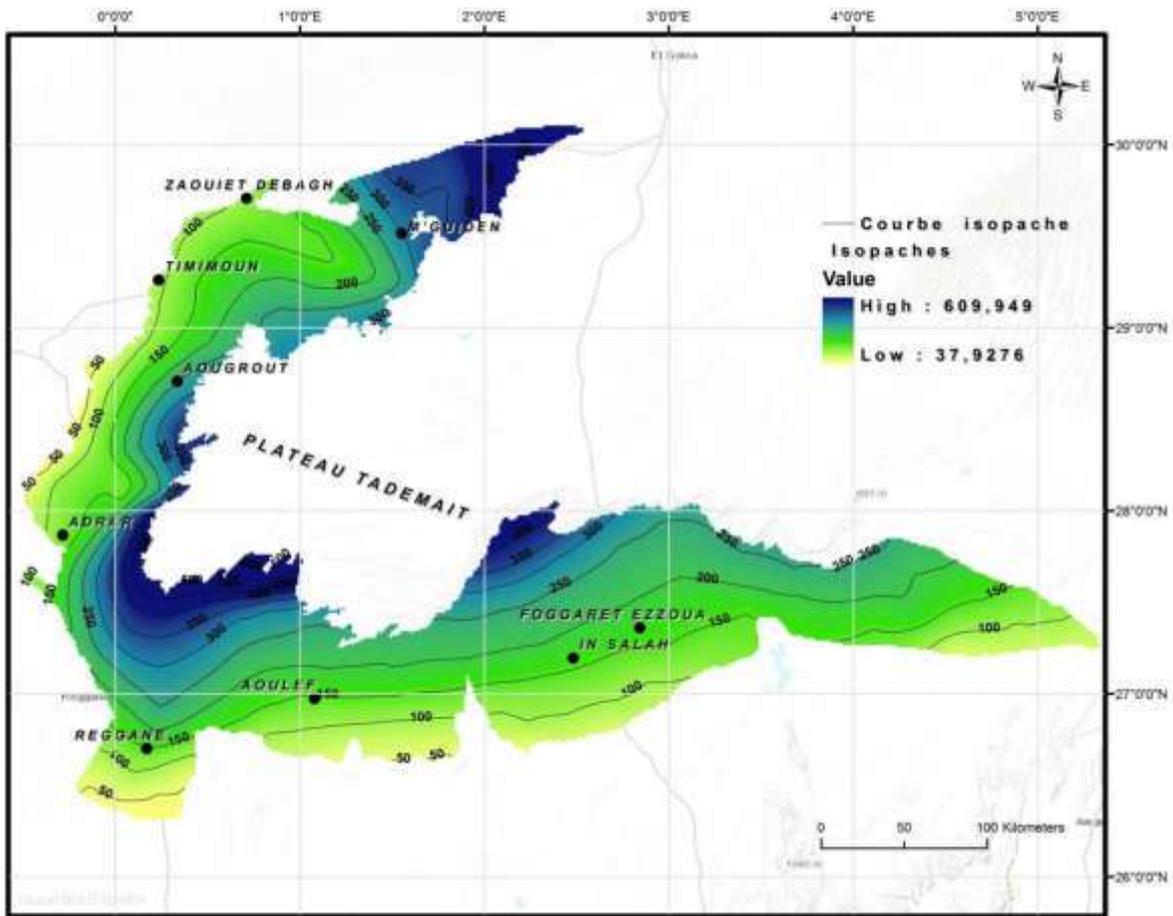


Figure 13 Carte des épaisseurs du Continental Intercalaire [23].

2.4.3. Paramètres hydrodynamiques

Etant donné la grande superficie du continental intercalaire (CI). Les paramètres hydrodynamiques de la nappe varient d'une zone à l'autre suivant les types des formations géologiques qui prédominent:

✓ La transmissivité

Les travaux d'essai de pompage ont permis de déterminer la valeur de la transmissivité dans l'Erg Occidental. La transmissivité correspondante serait de l'ordre de 10^{-2} m²/s, la porosité des formations continentales peut être évaluée à 25 % [21].

✓ **Coefficient d'Emmagasinement S**

Le rapport établi par l'observatoire du Sahara et du Sahel [21] a montré que les valeurs de coefficient d'emmagasinement dans la région d'étude sont de l'ordre de 0.05 dans la partie où le CI est libre et entre 0.005 et 0.0004 sous le Grand Erg Occidental et le plateau de Tademaït, là où le Continental Intercalaire s'enfonce et la nappe devient captive sous le recouvrement du crétacé supérieur du plateau de Tademaït [19].

2.4.4. Puissance utile du réservoir du CI

L'épaisseur de la formation du continental intercalaire varie du nord vers le sud et déborde de même vers la Tunisie et la Libye, l'est vers l'ouest. Selon les données des forages semi profonds, son épaisseur oscille entre 150 m et 400 m.

2.4.5. La piézométrie de la nappe du continental intercalaire

La base des données du bassin Occidental sur l'ensemble des points d'eau (forage et puits) montre la caractérisation piézométrique de la région d'étude. Le sens d'écoulement semble être du Nord-Ouest vers le Sud-Est pour être repris ensuite par un sens d'écoulement du Sud vers le Nord-Est. Les eaux convergent vers l'exutoire tunisien par la faille de Médenine [20]

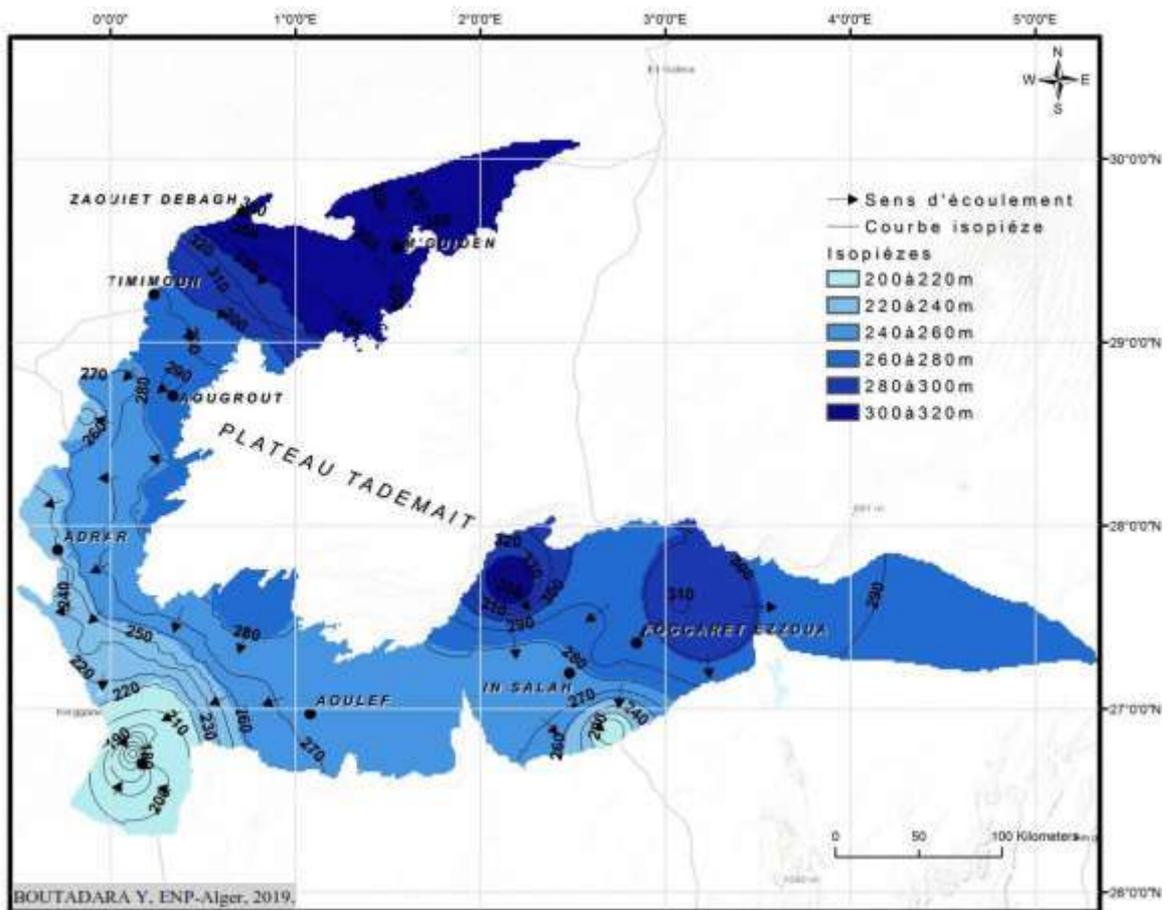


Figure 14 Carte piézométrique du CI 2007 [18, 23]

A partir de cette carte (figure 14) on peut observer que le sens d'écoulement de la nappe est orienté Nord-Est Sud-Ouest, avec un abaissement du niveau piézométrique dû à la sur exploitation de la nappe. Le gradient hydraulique est faible, il est de l'ordre de 0,003 dans la région de Tasfaout, pour les autres régions le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,0001 au centre et de 0,0002 à l'Est de la zone d'étude [19].

2.5. Conclusion

L'étude hydrogéologique a permis de percevoir la superposition des deux nappes constituant le SASS, à savoir le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI), le dernier est composé des formations meubles et représente l'unique ressource en eau fossile dans la région d'étude.

L'analyse des cartes illustrée dans ce chapitre a montré que la transmissivité est de l'ordre de 10^{-2} m²/s et le coefficient d'emménagement est de 0,004. L'écoulement de la nappe du CI se produit du piedmont de l'Atlas vers les zones des foggaras au Sud. La nappe du CI est libre sur les zones d'affleurement où se trouve notre région d'étude.

Chapitre 3 Origine et principe de fonctionnement du système foggara

3.1.Introduction

En région aride et semi aride, l'irrigation représente un enjeu fondamental de suivi pour la population locale. Dans notre zone d'étude le système des foggaras est considéré comme l'une des solutions qui assurent les besoins en eau des habitants.

Ce système de captage et de partage de l'eau existe dans de nombreux pays depuis la Chine jusqu'au Maroc en passant par la péninsule Arabe et surtout l'Iran où la présence des qanâts est attestée depuis plus de 2000 ans [24]. La question de la durabilité du système de foggara a été largement évoquée dans la littérature, mais la question du partage de l'eau du système entre les copropriétaires reste un problème qui nécessite des recherches scientifiques.

Dans ce chapitre, nous présentons les mécanismes hydrauliques utilisés dans la gestion et l'exploitation des foggaras, afin d'assurer sa sauvegarde et son fonctionnement. Le mode de captage des eaux dans la région d'étude qui est spécial et unique, basé essentiellement sur un instrument de mesure appelé *chekfa* fabriqué par le *kiel elam*.

3.2.Historique sur le système foggara dans le monde

Nombre d'auteurs, historiens, assyriologues, suivis par les anthropologues, ont popularisé cette hypothèse traditionnelle du lieu et de la date de l'invention de système de qanât.

L'origine de ce system et sa diffusion dans le monde sont faites toujours l'objet de plusieurs séminaires et débats entre les scientifiques. Le texte de Polybe présente la première référence qui atteste de l'existence du système de foggara et/ou qanât daté de l'époque antique-à la fin de II siècle avant notre ère [25].

L'ingénieur français Henri Goblot, qui travaillait en Iran est basé sur l'hypothèse de l'historien grec Polybe qui, au 2^e siècle avant J.-C., rapporte l'existence dans le nord de la Perse d'un système de lignes de puits qui auraient été reliés entre eux par une galerie [26].

Les Perses au temps de leurs règnes en Asie, accordèrent le droit à ceux qui amenaient de l'eau de source (hydro peigne) à certaines zones, qui auparavant n'étaient pas irrigués. Ils construisent ainsi des canaux souterrains, qui amènent l'eau de loin [25]

D'autres ont mentionné que l'invention du *qanāt* est portée au crédit du royaume d'Urartu, qui englobait aux 8^e et 7^e siècles avant J.-C. la Turquie orientale, l'Arménie et le nord-ouest de l'Iran [27].

Le Polybe a défini le qanât comme était un canal souterrain conduisant des eaux de pluie a travers des galeries drainantes [25].

3.3.Système d'aqueduc en Luxembourg

En Europe et exactement dans le site des *Raschpëtzer*, à proximité de *Walferdange*, le Luxembourg dispose de l'un des aqueducs souterrains d'origine romaine les plus imposants et

les mieux conservés parmi ceux situés au nord des Alpes. Il s'agit en fait d'une conduite d'alimentation en eau potable, construite d'après le principe du qanât (figure 15).

Les connaissances et l'expérience des constructeurs romains dans des domaines techniques tels que la géologie, l'hydrogéologie, la construction de tunnels, la mécanique des sols et la géodésie s'avéraient être absolument remarquables à partir de ce captage de l'eau et d'alimentation de la galerie qui se trouve à 20 mètres sous la surface de la dépression du *Haedchen* et fonctionne toujours de façon à ce que l'eau coule jusqu'à nos jours encore et ce au moins dans les parties supérieures et moyennes de l'installation (figure 15,16) [28] .

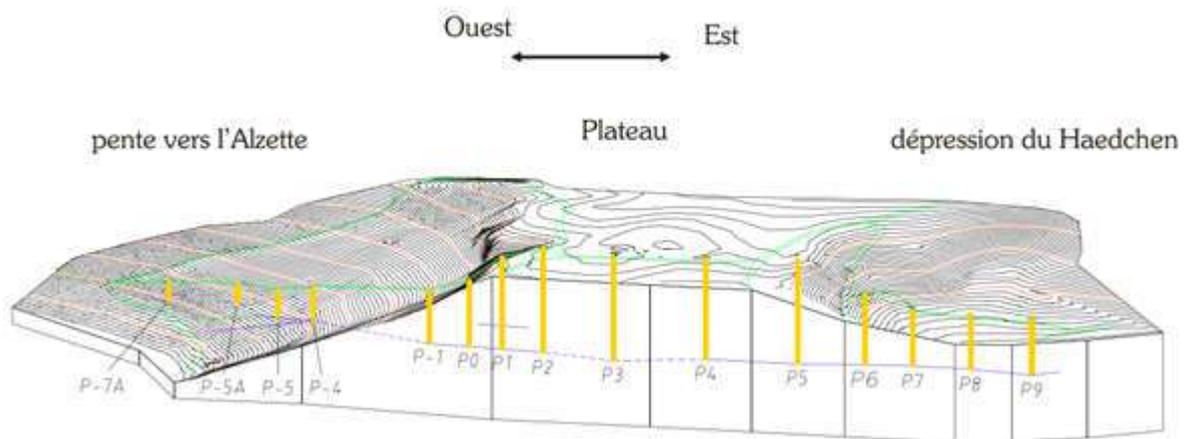


Figure 15 L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer utilisé par les Romains [28].



Figure 16 Vue aérienne d'un puits appartenant à l'aqueduc souterrain des Raschpëtzer [28].

3.4. Système du Qanat en Iran

Les qanâts étaient utilisés dans les zones arides et semi-arides du monde entier, L'importance des qanâts dans les régions arides où les précipitations annuelles ne dépassent pas 150 mm a été bien établie et les qanâts conservent leur importance dans ces régions à ce jour [29, 30].

En Iran les qanâts sont concentrés sur le plateau iranien, en particulier dans les régions autour du désert central d'Iran, y compris les villes de Yazd, Kerman, Bam, Birjand, Ghayen, Ferdows, Gonabad, Tabass, Kashmar, Sabzevar, Semnan, Damghan, Garmsar, Kashan et le vieux Téhéran, qui utilisent la technologie qanât depuis plus de 2000 ans [30].

En Iran, la plupart des galeries sont longues de 5 à 10 km, avec un puits-mère à plusieurs dizaines de mètres de profondeur à l'extrémité amont du tunnel (figure 17). Établir un qanât est un travail collectif qui demande plusieurs mois ou années, même pour les qanât de dimensions moyennes, sans même parler des dimensions records (puits-mère de 300 m de profondeur, galerie longue de 70 km, dit-on, dans le nord-est de l'Iran) [31].



Figure 17 Vue aérienne d'une série de puits de plusieurs qanât en Iran [32].

3.5. Qanat en Espagne

La capitale de l'Empire espagnol, Madrid, était jadis l'une des villes les plus influentes du monde. Inconnu pour la plupart des gens, c'est le fait que les qanâts des eaux souterraines ont soutenu la vie quotidienne de Madrid pendant environ 800 ans [33].

Cette note historique fournit un bref compte rendu des plus aspects notables des qanâts de Madrid, y compris leur disposition, leur montée et leur chute, la qualité de leurs eaux, et leur état actuel de conservation [33].

La technique de construction des qanâts a été décrite par différents auteurs [34]; [35]. Un puits bien est creusé en premier afin d'évaluer la profondeur de la nappe phréatique. Sur la base de cela, un point de sortie inférieure pour la galerie est calculé. Le tunnel est ensuite foré pour unir les deux emplacements. Verticalement des puits sont creusés en cours de route. Ceux-ci facilitent l'accès à la galerie et l'élimination des déblais en son sein au cours du creusement, ainsi que sa ventilation. Pendant la phase opérationnelle, les arbres sont généralement plafonnés pour éviter les accidents et les sources potentielles de contamination. Alors que le tunnel croise la nappe phréatique [33].

Les eaux souterraines sont fortement liées à la naissance et histoire de Madrid. En fait, certains auteurs estiment que le nom même de la ville provient de «Mayrit», un complexe entre « mayra » (le mot arabe-espagnol pour qanat) et « Etum » (« abondance » en latin). En d'autres termes, Madrid signifie «le lieu de nombreux qanat s» [36].

Les qanats de Madrid sont souvent appelés « viages », du latin « Via aquae » (« voie d'eau »). Autres traditions locales également se réfèrent aux eaux souterraines. La construction des qanats à Madrid (figure 18) peut être attribuée à deux motifs principaux. Première, les galeries d'eau souterraine ont fourni une source d'eau plus stable et plus abondante que les ruisseaux voisins, dont les débits diminuent pendant la saison sèche. Et en second lieu, elles élèvent l'eau du ruisseau Manzanares dans la ville ne sera techniquement réalisable que des siècles plus tard [33].

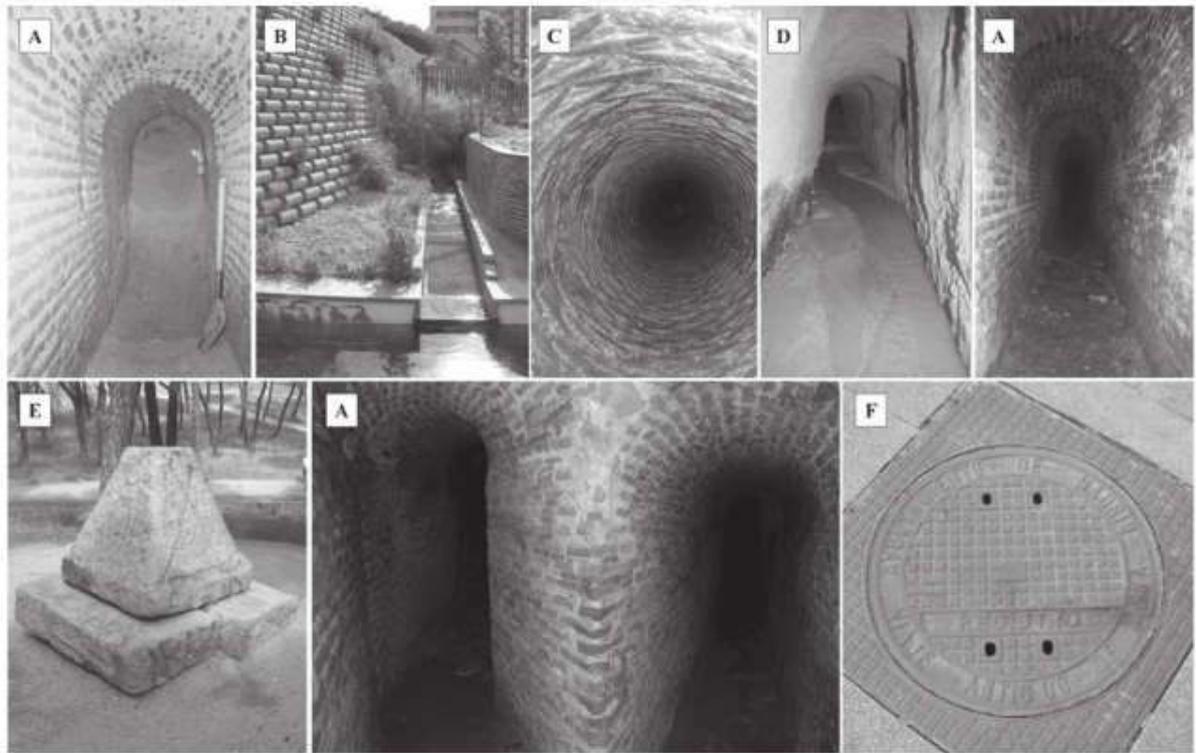


Figure 18 Quelques vestiges des anciens qanats de Madrid [33].

3.6. Aqueduc en Rome

L'un des premiers exemples d'exploitation de l'eau souterraine pour soutenir la civilisation humaine est l'aqueduc système de la Rome antique. Bien que certains des aqueducs étaient alimentés par l'eau de surface, la plupart étaient alimentés par des ressorts, généralement augmentés par des tunnels pour augmenter l'écoulement des eaux souterraines [37].

Les Romains n'étaient pas les premiers à construire un aqueduc. Il ne semble pas non plus raisonnable de considérer l'aqueduc lui-même comme une nouveauté de toute ampleur [37].

des aqueducs ont été construits : l'Anio Vetus (272 à 269 avant JC), Aqua Marcia (144 à 140 avant JC) et Aqua Tepula (126 à 125 avant JC) ([38]. La plupart des Romains ont probablement obtenu leur approvisionnement quotidien en eau des fontaines alimentées par les aqueducs [37].

3.7. Qanat en Arabie saoudite

La présence de qanât en Arabie saoudite a été centrée sur la présence de sources naturelles telles que ceux d'Al Qatif, Al Hasa et Al Kharj; Al Layla-Al Aflaj; ou ceux de l'ouest de l'Arabie saoudite, parmi lesquels l'Ain Zubaydah qanât. Al Layla, dans le centre de l'Arabie saoudite (figure 19), par exemple où un seul lac alimenté par une source, couvrant une superficie de 4 km, les qanâts étaient développés autour du lac [39, 40].



Figure 19 Vue aérienne des qanâts à Abraq Farzān [40].

3.8. Qanat en Égypte

D'après l'Institut Français d'archéologie Orientale (IFAO) étudié depuis 1994 le site d'Ayn Manawir. le peuplement Humain est évalué sur le site à la fin du paléolithique jusqu'au 3^e siècle après JC. Les cueilleurs-chasseurs paléolithiques se sont installés autour des sources artésiennes. À la fin du 3^e millénaire avant notre ère, ces sources se tarirent et les hommes quittèrent le site [41].

Les qanâts, une innovation technique de l'époque en Égypte, ont permis la réinstallation d'un peuplement humain. Un temple en briques de terre crue et des maisons dans lesquelles des documents datés ont été trouvés, ainsi que des jardins et des champs ouverts dispersés au pied des pentes de la colline « Ayn-Manâwîr » (figure 20). La fouille et le détail l'étude de l'un de ces qanâts et des systèmes d'irrigation ont donné les clés pour comprendre la méthode de creusement du tunnel, la gestion des ressources en eau et l'historique des tentatives de maintenir l'approvisionnement en eau le plus tard possible. De plus, les données fournies par les contrats démotiques et par les vestiges floraux permettent de reconstruire le milieu ancien. L'existence de l'énorme nappe souterraine sous le désert occidental égyptien, la géomorphologie particulière de cette partie de ses oasis a permis de faire nécessaire le creusement des Qanats pour assurer la permanence humaine dans cette région aride [41].



Figure 20 Trois qanats sur le versant nord de la colline Ayn-Manâwîr.

3.9.Qanat à Oman

Selon la tradition omanaise, le mot *afalaj* désigne une rigole creusée dans le sol, et dans laquelle l'eau s'écoule, à partir de nappes phréatiques ou de wadis. Le *falaj*, tel qu'il est utilisé à Oman -et dont le pluriel est : *aflaj* - est le terme générique désignant un système particulier d'irrigation authentiquement omanais et intimement lié au sol de ce pays et à son histoire [42, 43].

Ce système est alimenté par les nappes phréatiques et semi-phréatiques, selon un procédé rudimentaire, sans l'aide de machines, au service de l'agriculture et de toutes les autres utilisations possibles [42, 43].

Malheureusement, les agriculteurs et propriétaires d'Oman *aflaj* ne connaîtraient pas exactement la date à laquelle ces *aflaj* construits en Oman. La mythologie, qui est très répandue parmi la population locale, déclare que le King *Suliaman bin Daud* pendant son séjour à Oman d'un voyage à Yémen. Il est resté à Oman 10 jours, il a donc commandé à un Démon de creuser 1000 qanats chaque jour (figure 21). Ce qu'explique pourquoi le type qanat *aflaj* appelé «*Daudi*» *Aflaj* [44, 45].

Wilkinson (1977) a fait valoir que les *aflaj* d'Oman ont tous été construits pendant l'occupation perse pour Oman dans l'Achaéménide (550-331 av.J.-C.) et Sasanide (jusqu'au milieu du septième siècle après J.C [44].



Figure 21 Exemple d'Aflaj à Oman.

3.10. Qanat en Chine

Les écrivains chinois supposent que la technique a été développée indépendamment en Chine continentale et a été amenée à Turpan pendant la première période de contrôle chinois sur la région pendant la dynastie Han (220 av.J.-C. – 206 après JC) [46, 47]. le Karez de Turpan a une origine perse datée au début du XIXe siècle [48].

Karez sont construits manuellement, et la construction peut prendre jusqu'à huit ans. Les techniques et les outils sont demeurés presque inchangés sur 2.000 ans (figure 22). Le processus commence par creuser de la verticale les axes, qui sont alors liés par un canal souterrain [49].



Figure 22 Karez de Turpan Chine [49].

3.11. Khettara au Maroc

Pour le Maroc, divers auteurs témoignent de l'importance passée des khettaras dans le développement local oasien [50]. On peut signaler la très longue histoire des khettaras marocaines qui se comptent en siècles, voire en millénaire. Certaines controverses existent sur l'introduction des techniques et des savoirs hydrauliques. À Marrakech, l'essor des khettaras a été identifié comme concomitant à la fondation de la ville sur le Tafilalet, certains auteurs avancent l'idée d'une fondation liée à Sijilmasa et à l'arrivée de population juive sur la région au 1^{er} siècle [50].



Figure 23 Exemple de khettaras marocaines [50].

3.12. Système de foggara en Algérie

Le terme "*foggara*" désigne une canalisation d'eau souterraine. Le mode de captage varie suivant l'origine des eaux. Simple aqueduc dans certains pays, elle représente au Sahara algérien tout un système de drainage souterrain des nappes aquifères (figure 24). Etymologiquement, il semblerait que le mot provient du verbe arabe « *fequer* » qui a deux sens : creuser, être pauvre. Certains auteurs y verraient l'étymologie de l'adjectif « *mofgour* » qui veut dire éventrée. Quoiqu'il en soit « *foggara* » apparaîtrait comme une forme d'intensité populaire de "*Fogra*" [51].

Le groupe Barmaka descendant des Boramiq originaires de l'Iran, disgraciés par Haroun el Rachid au VIII^e siècle et émigrés au IX^e siècle en Afrique du Nord est attribué la maîtrise des techniques des foggaras du Touat aux Juifs et Berbères judaïsés réfugiés de Cyrénaïque [52]. Après cette époque, les arabes qui habitent à cette région travaillent à développer l'agriculture et le système d'irrigation (le réseau d'irrigation des foggaras) par

l'utilisation de leur civilisation dans l'agrandissement du système, et ils ont travaillé aussi à établir le calcul des parts de chaque propriétaire et introduisent leur mode original de constitution [52].

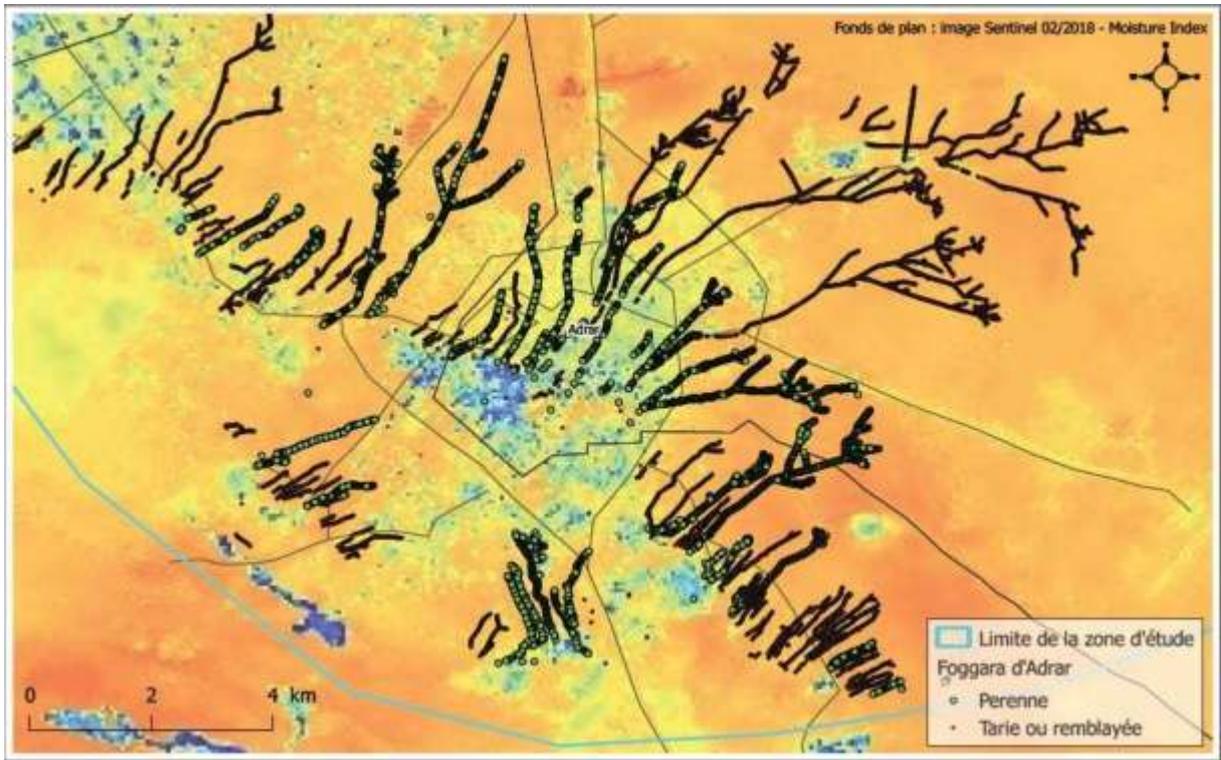


Figure 24 Carte de situation de système de foggara ville d'Adrar –CDN Adrar.

3.13. Principe de fonctionnement de système foggara

Selon la direction des services agricoles (DSA) d'Adrar, la superficie irriguée dans le secteur traditionnel est passée de 9 800 hectares en 1980 à 15 121 hectares en 2014. Une bonne partie de cette superficie est encore irriguée par les foggaras et le reste par des puits et des forages individuels, familiaux ou collectifs installés à l'intérieur des anciennes parcelles ou sur des parcelles d'extension. Cette continuité dans l'exploitation des foggaras se fait de manières différentes d'une zone à l'autre, d'une oasis à l'autre et même d'une foggara à l'autre selon les spécificités sociales, économiques et environnementales de chacune [53].

La technique de fonctionnement de ce système de captage des eaux souterraines est simple : il s'agit d'épouser la configuration du terrain pour mobiliser les eaux souterraines, en vue d'alimenter les champs irrigués. Concrètement, il s'agit de creuser un puits environ chaque 50 m, les fonds de ces puits sont connectés entre eux par des galeries [53].

Le principe général de fonctionnement de la foggara au Touat, Tidikelt et Gourara répond au schéma figure 25. Dans la partie amont entre les points D et F la galerie pénètre sous la surface de la nappe phréatique et la draine, tandis que la partie avale, entre les points D et B permet, grâce à une légère pente, l'écoulement des eaux vers la surface du sol. Pour que la

création d'une foggara soit possible, il est nécessaire donc que la nappe phréatique soit à une cote supérieure à celle des jardins à irriguer. Cette condition est généralement remplie quand une région plate est drainée par un système de dépression (oueds ou sebkhas) qui provoque un rabattement important de la nappe. C'est bien le cas du Touat, du Gourara et du Tidikelt où la dépression, formant gouttière s'étend sur près de 400 Km [5, 54].

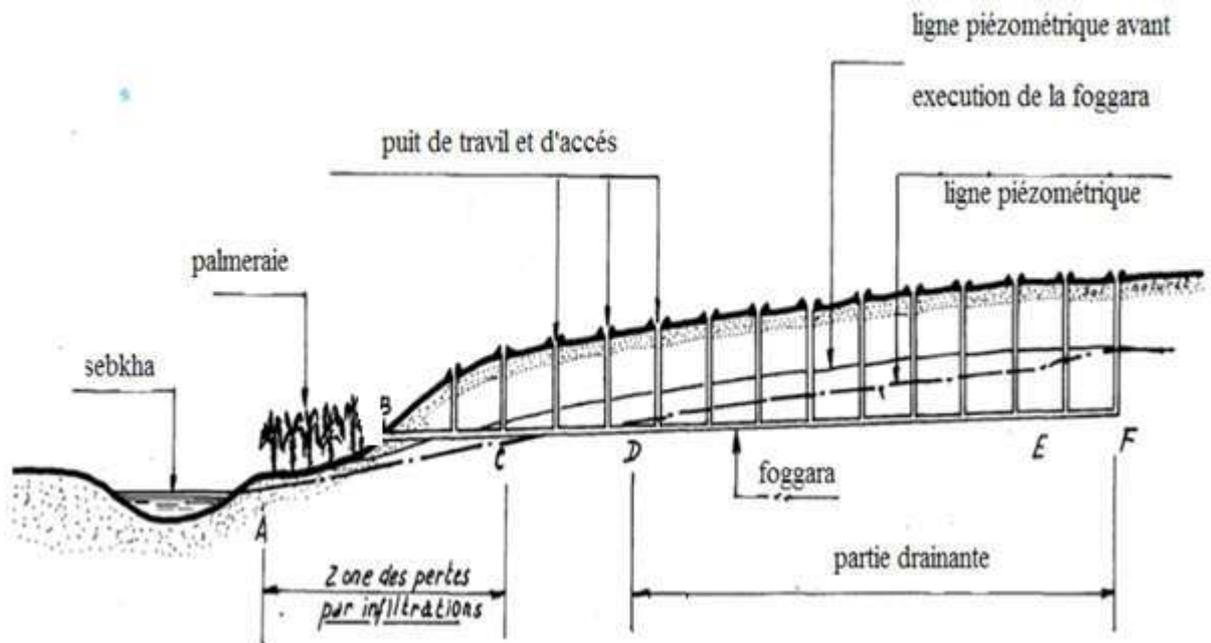


Figure 25 Système de fonctionnement de foggara [55].

3.14. Gestion et partage des eaux de foggara

L'établissement d'une foggara est essentiellement une œuvre collective. Il est extrêmement rare et tout à fait anormal qu'une foggara soit la propriété d'un seul individu. Chacune d'elles appartient à un groupe de propriétaires. Ce régime de la copropriété pose le problème de la répartition de l'eau. La façon dont s'opère cette répartition n'est pas d'une moindre originalité que le procédé de captage lui-même. En faisant abstraction de certaines particularités locales, dans le Touat, Gourara et le Tidikelt, les choses se déroulent généralement comme suit:

Avant tout partage de l'eau, parfois même avant que les travaux de fouille soient terminés, tous ceux qui ont participé à l'établissement de la foggara soit par leur travail, soit par leur capitaux, procèdent à une première répartition purement théorique. On fixe pour chacun une part proportionnelle à son apport. Le débit est divisé à cet effet en un certain nombre de parties appelées « *guesmas* », chaque *guesma* se subdivise en « *maajens* » qui se subdivisent elles-mêmes en unités plus petites appelées suivant les régions « *habba cerira* » ou « *kira cerira* ». Au Touat toute foggara, quel qu'en soit le débit se divise initialement en 24

guesmas. La *guesma* renferme un certain nombre variable de *maajens* et enfin le *maajen* se subdivise en 24 « *habba cerira* » [55].

Ce partage est consigné dans un écrit spécial appelé « *zmam el foggara* », qui est essentiellement la liste nominative des propriétaires d'eau avec l'indication de leur part. Cette liste est tenue à jour, et tient compte des mutations de propriété par des témoins, sachant lire et écrire l'arabe, les « *chahed* ». Les répartitions d'eau nécessitent des opérations équivalentes à la règle de trois, mais celles-ci étant absolument inconnues chez les Oasiens, ils doivent pour arriver aux résultats utiliser des méthodes très compliquées. Il est inutile de préciser que pour la majeure partie des Ksour, une seule personne est capable de faire des calculs. Dans les grandes oasis comme Timimoun, il y en a cependant trois ou quatre.

On les appelle « *hasseb* » comptable, ou « *Amin* », homme de confiance. C'est une véritable charge que les responsables lèguent à leurs enfants. [55]

On voit que dans cette région où l'eau est la base de la propriété, les *Ksouriens* ont su établir un véritable état-civil de la propriété, institution d'un régime foncier savant et évolué, qui remonte à un passé assurément fort éloigné. Toute mesure ou répartition s'accompagne d'une inscription dans un ou des registres spéciaux affectés aux partages, achats et ventes d'eau. La part de chacun étant ainsi déterminée, on procède, la foggara achevée, au partage du débit obtenu. C'est ici qu'apparaît toute la singularité des méthodes locales. Alors que la répartition par temps « *nouba* » (littéralement tour d'eau) prévaut dans toutes les autres oasis du Sahara algérien, les habitants du Touat, du Gourara et du Tidikelt ont adopté la répartition en "volume" [55].

La première opération est la mesure du débit de la foggara. Elle s'effectue non seulement lors du premier établissement de la foggara, mais lorsque le débit initial se modifie, soit qu'il ait été réduit par des éboulements de la galerie, soit qu'il ait été, au contraire, augmenté à la suite de travaux de réfection ou d'extension. Parfois même, elle est faite à intervalles réguliers. C'est donc une opération relativement fréquente que toute personne séjournant un certain temps dans ces régions peut avoir l'occasion d'observer. [55]

Elle est dirigée par une sorte de spécialité, « *le Kiel el ma* », mesureur d'eau ; nommé par la djemaa du ksar en considération de ses connaissances et de son intégrité. La charge du "Kiel el ma" passe souvent de père en fils. Bien qu'elle soit le plus souvent confiée à des personnes sans considérations de classes ou de castes, une grande considération s'y attache. Cette considération n'est d'autant plus grande que le "Kiel el ma", n'est pas seulement un expert hydraulicien, mais aussi une espèce de juriste que l'on consulte sur les cas difficiles et auquel on a recours lorsque surgit une contestation.

L'instrument de mesure porte le nom de « *chekfa* » dans le Tidikelt; Touat, ou “ « *helfa* » (littéralement “celle par laquelle on jure), communément appelée de même « *el kiel el asfar* » “le mesureur jaune” [55].

3.15. Base de donnée sur la foggara

L'inventaire et les rapports des investigations sur les foggaras fournies par l'observatoire de la foggara et les associations des foggaras locales ont été menés pendant la période 2013-2016. Ces données ont été considérées comme base d'information sur le système d'exploitation des eaux souterraines.

Tableau 9 Donnée de base sur le système foggara région d'étude (année 2016)

Commune	Nombre Foggaras	Nombre Puits	Débit (l/s)
Adrar	7	3 066	0,6-1,4
Bouda	23	1 648	0,4 – 16 ,1
Timmi	16	653	0,1-1,7
Tamentit	49	7 304	0,1-5

3.16. Conclusion

Le système de foggara se trouve dans plusieurs pays du monde a savoir l'Iran, Egypte, Chine, Maroc, Algérie, mais le mode de partage des eaux entres les copropriétaires dans la région du Touat est spécial.

De point de vue hydraulique, la foggara est un système de captage et de drainage gravitaire des eaux souterraines (CI), afin de les utiliser aux différents usages notamment l'irrigation et l'alimentation en eau potable.

La durabilité de fonctionnement du système foggaras nécessite un savoir faire de la part des techniciens (*kiel elma*) qui ont contribué de père en fils par leurs outils (*chekfa*) dans l'amélioration et le sauvegarde de mode de partage des eaux entre les copropriétaires principales du système.

Chapitre 4 Matériels et méthodes

4.1.Introduction

Ce chapitre développe les réflexions et les recherches présentées dans le troisième chapitre, les méthodes adaptées de partage des eaux en utilisant l'instrument de mesure *chekfa* (sa dimension, sa fabrication et son mode d'emploi) sont prises en compte pour la validation des calculs liés au système foggara.

Face aux transformations sociales, économiques et environnementales remarquées durant les dernières décennies dans notre région d'étude, l'eau du système de foggara est peut subir à une vulnérabilité directe à la pollution, et par conséquent la durabilité de ce système est mise en danger.

La méthode DRASTIC a été décrite dans cette section afin d'estimer la vulnérabilité à la pollution des nappes alimentant le système foggara en zone d'étude.

4.2.Partie I : Etude quantitative de système de foggaras

4.2.1. Mode de partage des eaux de foggaras

Les méthodes utilisées dans la distribution équitable de la quantité d'eau qui arrive à travers les galeries souterraines, se font en utilisant l'instrument de mesure « *chekfa* ». L'unité de mesure principale de la *chekfa* selon les peuples qui occupent les régions du Touat, Tidikelt et Gourara, est désignée respectivement par *habba zérig*, *habb* et *Aoud*.

Les *hassabines* utilisent une plaque de nature argileuse pour montrer aux propriétaires, et les autres citoyens utilisent *la habba* et ses unités de fraction par des signes conventionnels simples à comprendre. Ainsi toutes les opérations réalisées par les *hassabines* (résultat de mesure) sont archivées et conservées.

Dans notre cas, nous avons utilisé un *chekfa*, qui a été aimablement fourni par le responsable de l'association foggara de la région de Tamentit et Timimoune. L'expérience s'est déroulée comme suit (figure 26 et 27): le *chekfa*, dont les orifices sont déjà bouchés, a d'abord été placé juste à la sortie de *segua* pour barrer le flux entrant et former un petit bassin. Une fois que le niveau d'eau dans le bassin a atteint le niveau de débordement, plusieurs orifices ont été débloqués jusqu'à ce que l'équilibre soit établi ; en d'autres termes, la quantité d'eau qui entre dans le *chekfa* depuis la *segua*, et la quantité d'eau qui sort par les orifices que nous avons ouverts progressivement sont considérées comme étant la même quantité seulement si le niveau d'eau dans le bassin reste stationnaire. Cet équilibre peut être connu grâce à des indicateurs gravés sur la plaque du *chekfa*. On a ensuite compté le nombre de trous pour connaître le débit d'eau de foggara.



Figure 26 Vérification de pente entre l'amont et l'aval du déversoir de partage.



Figure 27 Méthode d'emplacement de *chekfa* durant les mesures

4.2.2. Fabrication de la *chekfa*

La *chekfa* est une plaque en cuivre de faible épaisseur qui variant entre 1 à 2 mm, il existe deux formes dans la région d'Adrar, recourbées en cylindre au Tidikelt, rectangulaires et planes au Touat et au Gourara. L'homme qui confectionne la *chekfa* utilise une méthode particulière et précise. En premier lieu, il perce la plaque qui constituera la *chekfa* à l'aide d'un outil en acier appelé elmatkoube. Il réalise ainsi une rangée de trous de différents diamètres. Ils correspondent à l'unité de débit ainsi qu'à des multiples et sous multiples de cette unité. L'unité généralement employée est la « *habba* » ou, plus exactement, la "*habba* kébira", qui correspond en moyenne au débit fourni par une ouverture qui varie entre

l'intervalle de 8 mm et 11 mm de diamètre. Cela dépend de la région et du débit qui s'écoule après le « nouba ». Cette dernière est une opération collective qui demande la participation des tous les propriétaires d'une foggara pour creuser les puits, les galeries ainsi que les travaux de dessablement et toute action qui a pour but d'augmenter la quantité d'eau dans la foggara.

L'augmentation du débit obtenu définit la « habba zerig ». En fait, la *habba zérig* correspond à l'augmentation ou bien la diminution de la *habba kbira* (maaboud) et mesure le fonctionnement du système au cours du temps.

En second lieu, le fabricant associe à la plaque désignée un support en cuivre qui assurera la stabilité de la *chekfa* au cours de la mesure. Ainsi un diamètre de référence (repère) au dessus et au milieu de la plaque (figure 28).



Figure 28 Forme de *chekfa* (∅ diamètre de l'orifice en mm et ∴ || symboles sculptés sur la plaque).

4.2.3. Exemple sur la distribution des eaux de foggara

Supposons que 36 individus ont participé à la réalisation d'une foggara, dont le débit est de 86 *habba*. Ce débit doit être distribué équitablement à chaque individu en considérant qu'ils ont chacun dépensé la même somme des frais dans la réalisation de cette foggara. Donc l'opération de la distribution se fait de la manière suivante :

$\frac{86}{36} = 2 \text{ habba et } \frac{14}{36} \text{ habba}$ on remarque que $\frac{14}{36} \text{ habba}$ est petit par rapport à 1 *habba*, autrement dit il est inférieur à la *habba*. C'est pour cela que l'on doit la multiplier par 24 pour la transformer en *kirat (fels)*. Donc le calcul devient :

$$\frac{14}{36} \text{ habba} = \frac{14}{36} * 24 = \frac{28}{3} \text{ kirat} = 9 \text{ kirat et } \frac{1}{3} \text{ kirat}$$

D'autre part $\frac{1}{3} \text{ kirat} = \frac{1}{3} * 24 \text{ kirat du kirat}$ et cette dernière somme représente un débit extrêmement faible. On l'ignore et comme cela la part de chacun de ces individus doit être 2 *habba* et 9 *kirat*.

4.3.Partie II : Etude qualitative (vulnérabilité a la pollution) de système de foggaras

4.3.1. Généralité sur la pollution des eaux souterraines

La pollution d'une eau superficielle est la dégradation de sa qualité en modifiant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les effets indésirables de ce phénomène sur les organismes vivants ont fait l'objet de nombreux travaux.

Cette pollution provient de plusieurs sources d'origine anthropique [56], les principales sont :

- ✓ Urbaines (activités domestiques ; eaux d'égout, eaux de cuisine...etc).
- ✓ Agricoles (engrais, pesticides...etc)
- ✓ Industrielles (agroalimentaire, chimie-pharmacie, pétrochimie, raffinage...).

4.3.2. Types de pollution

Trois grandes familles caractérisent la pollution :

1. Pollution physique

Elle résulte de différents éléments solides entraînés par les rejets domestiques et industriels.

On distingue :

- **Pollution solide**: elle provient des particules solides apportées par les eaux industrielles ainsi que les eaux de ruissellement et issue des décharges de déchets à ciel ouvert.
- **Pollution thermique** : causée généralement par les eaux des circuits de refroidissement des usines, en effet tout changement de température de l'eau a des conséquences significatives sur l'équilibre écologique du milieu aquatique naturel et la survie des organismes vivants.
- **Pollution radioactive** : liée aux rejets des éléments radioactifs par les installations et les centrales nucléaires ainsi que les usines de traitement de déchets radioactifs [57].
- **Pollution chimique** : Elle est due aux polluants chimiques de nature organique et minérale générés par les différentes activités anthropiques. Ce type de pollution regroupe les solvants, les métaux (Zn, Pb, Cd,...etc), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), les produits pharmaceutiques, les pesticides, les sels, etc...
- **Pollution microbiologique** : Elle provient de plusieurs sources comme les rejets des hôpitaux, l'agriculture ainsi que les rejets d'eaux usées. L'eau se charge alors de microorganismes pathogènes (bactéries, virus, parasites) qui peuvent être dangereux pour l'environnement et pour la santé humaine [58].

4.3.3. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux foggara

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est dérivé de l'hypothèse que le l'environnement peut protéger les eaux souterraines contre toute source de pollution [59], en particulier les polluants qui ont la capacité de se pénétrer dans le milieu souterrain [60-63].

Le concept de vulnérabilité est souvent recouvert une notion de la gestion environnementale, dont évidemment la détermination de l'origine, le chemin et le régime de la pollution [59]. l'origine est la source du contaminant, le chemin définit le milieu dans lequel le contaminant est transporté (du moment où il s'infiltré en surface, dans toute la zone non saturée et la zone saturée) pour atteindre les eaux souterraines, qui peut être un puits ou une source [64, 65].

Selon Babiker et al, 2005 [66], la vulnérabilité des eaux souterraines peut être définie comme la possibilité de la percolation et la diffusion des contaminants de la surface du sol vers le système d'eau souterraine; il ne traite également que le cadre hydrogéologique bien qu'il ne soit pas pris en compte l'atténuation des polluants et il peut être identifié pour un système donné exposé à un danger ou à un groupe de dangers [67].

Il existe généralement deux termes pour les cartes et les évaluations de la vulnérabilité des eaux souterraines; intrinsèque et spécifique. La vulnérabilité intrinsèque est basée sur l'évaluation des conditions climatiques et géologiques naturelles et les attributs hydrogéologiques. Tandis que la vulnérabilité spécifique prend en compte les propriétés d'un contaminant particulier ou d'un groupe de contaminants à travers le sous-sol [68, 69].

Généralement, les aquifères souterrains exposés à la pollution provenant de différentes sources (ponctuelles ou non ponctuelles) a savoir les activités agricoles, industrielles et ménagères. Au cours des dernières décennies, une évaluation appropriée de la vulnérabilité des eaux souterraines offre une base solide pour protéger les aquifères et pourrait être considérée comme une première étape de la pollution des eaux souterraines et de la protection de la qualité [70].

En conséquence, la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est un moyen efficace, faisable et crucial afin de protéger et de gérer les eaux souterraines, en particulier dans les régions où les conditions climatiques, la démographie et l'activité industrielle ont un potentiel très élevé [71, 72].

L'évaluation de la vulnérabilité des aquifères par les scientifiques est un facteur essentiel qui nous donne les solutions pour protéger les ressources en eaux souterraines [73]. L'évaluation de la cartographie en terme de vulnérabilité est peut être considérée comme une technique d'identification des nappes basée sur des facteurs hydrogéologiques [74].

Au cours des dernières décennies, les cartes de vulnérabilité sont utilisées comme des outils de prédiction, de gestion et de planification des eaux souterraines afin de déterminer les risques et les enjeux. À partir de la fin des années 1980, il y avait tentative de formaliser la définition de l'expression et de développer des systèmes de cartographie associés. Récemment, diverses méthodes ont été développées pour évaluer la vulnérabilité des aquifères et à la protection des eaux souterraines dans les aquifères (Tableau 10)[59].

Tableau 10 Méthodes de vulnérabilité intrinsèque qualitative basées sur l'origine

Origine	Méthodes de vulnérabilité
Aller et coll., 1987	DRASTIC
Foster, 1987	GOD
Civita et De Maio, 1997	SINTACS
Doerfliger et coll., 1999	EPIK
Goldscheider et coll., 2000	PI
Vías et al, 2006	COP

La première carte de vulnérabilité a été préparée en France par Margat, 1968 [75], en Allemagne Vierhuff, 1981 [76] a dressé une carte de vulnérabilité de l'ancienne République démocratique d'Allemagne. Au cours de la dernière décennie, de nouvelles méthodologies ont été utilisées et développées à partir de modèle 3D [77-79]. Ce type de modèle est utilisé pour une meilleure compréhension et une représentation plus réaliste de carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères [59].

4.3.4. Description de la méthode GOD

Ce système a été développé par Foster en 1987 qui présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée [80, 81]

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères

- ✚ Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- ✚ Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- ✚ Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table) [82].

4.3.5. Description de la méthode SINTACS

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, développée par Civita et De Maio en Italie, au début des années 1997, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle [83]. Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC [84].

4.3.6. Description de la méthode EPIK

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensus stricto [85]. Elle est basée sur quatre critères :

- ✚ Epikarst (l'épikarst ou zone épikarstique rassemble l'eau d'infiltration dans un aquifère perché local et discontinu, drainé par le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides des petites dimensions, en une infiltration lente);
- ✚ Protective Cover (couverture protectrice: sol);
- ✚ Infiltration Conditions (conditions d'infiltration);
- ✚ Karst network développement (développement du réseau karstique).[86].

4.3.7. Description de la méthode PI

La méthode PI est une approche combinée basée sur le SIG pour cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines pour tous les types d'aquifères mais avec une attention particulière pour le karst. Elle est basée sur un modèle source-voie-cible : La surface du sol est supposée être la source potentielle de contamination, la nappe phréatique dans l'aquifère le plus élevé est la cible.

Le facteur P est calculé selon une version modifiée de la méthode [87] et divisé en cinq classes : P = 1 indique un degré de protection extrêmement faible protection, P = 5 indique une couverture protectrice très efficace.

Le facteur I indique dans quelle mesure la couverture protectrice est contournée en raison de la concentration de l'écoulement en surface et près de la surface [88].

4.3.8. Description de la méthode COP

La méthode «COP» a été développée pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères carbonatés dans le cadre du programme COST Action 620 de l'Union Européenne [89-91]. L'acronyme COP correspond aux initiales des trois facteurs utilisés: concentration des flux, couches supérieures et précipitations. La base conceptuelle de cette méthode, en fonction de l'approche européenne [80, 91, 92], est d'évaluer la protection naturelle des eaux souterraines, déterminé par les propriétés des couches situées au dessus de la nappe aquifère ou ce qu'on appelle aussi zone de vadose ou zone non saturée ;*Overling layers above the water*

table (facteur *O*), la concentration de l'écoulement ; *the Concentration of flow* (facteur *C*) et les précipitations au dessus de l'aquifère ; *Precipitation over the aquifer* (facteur *P*), comme les paramètres de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines. Cette méthode considère les caractéristiques du karst, comme la présence de dépressions en surface (facteur *C*) et l'étendue de leur bassin versant, ainsi que les formes du paysage karstique, sont des facteurs qui diminuent la protection naturelle apportée par les couches du dessus (facteur *O*). Le facteur *P* permet de considérer la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, en tant qu'agent de transport de la contamination.

4.3.9. Description de la méthode DRASTIC

En général, l'une des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines les plus utilisées est la technique de cartographie de vulnérabilité DRASTIC. Elle peut être utilisée à la description composite de tous les principaux facteurs géologiques et hydrogéologiques qui influencent et contrôlent le mouvement des eaux souterraines, dans, à travers et hors de la zone [93-95].

Les cartes de vulnérabilité des eaux souterraines peuvent être construites en utilisant la méthodologie DRASTIC. Bien que le DRASTIC signifie les sept paramètres hydrogéologiques utilisés dans le modèle qui prend en compte les paramètres suivants:

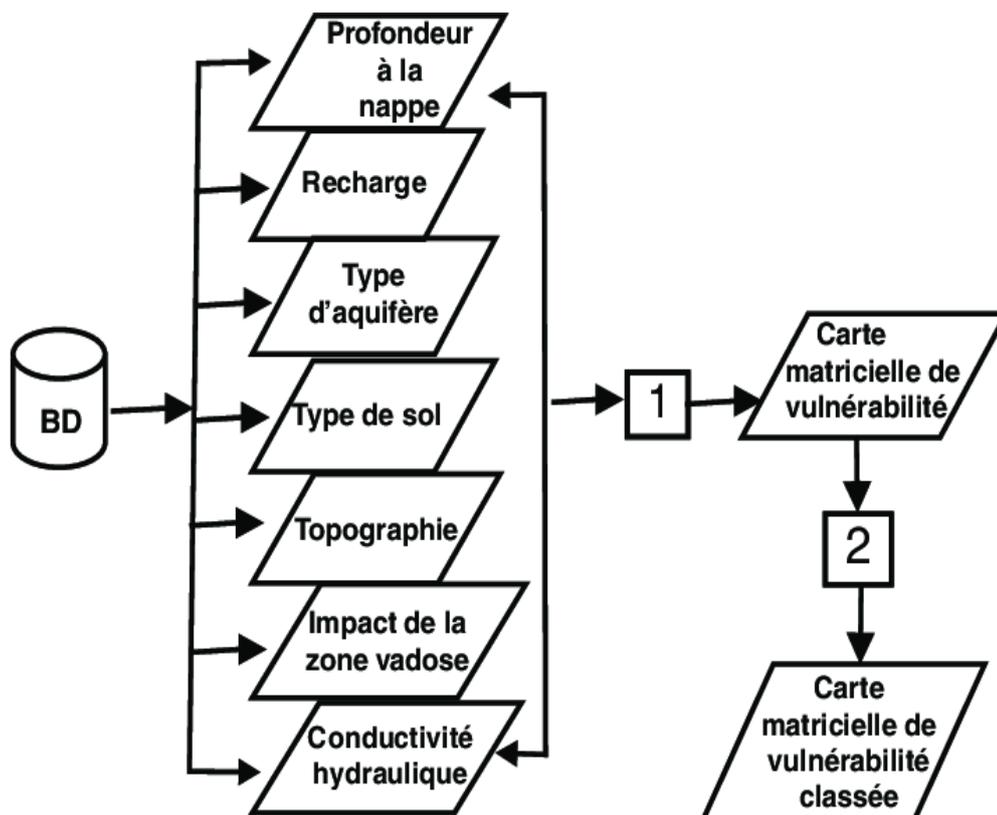
Profondeur de la nappe phréatique, **R**echarge nette, milieu **A**quifère, milieu du **S**ol, **T**opographie (% de pente), **I**mpact de la zone vadose et de la **C**onductivité hydraulique des aquifères [59, 96].

Dans le modèle DRASTIC, des valeurs de 1 à 10 sont attribuées à chaque paramètre, avec **(1)** signifie une faible vulnérabilité à la contamination, **(10)** signifie une grande vulnérabilité à la contamination des eaux souterraines (Aller et al., 1987). La contamination des aquifères causée par les pesticides utilisés en agriculture est un problème environnemental dans le monde. De plus, deux modèles DRASTIC ont été développés (1) vulnérabilité générique ou standard des eaux souterraines, (2) vulnérabilité aux pesticides [67]. Les deux modèles ont été largement appliqués. Le dernier est principalement utilisé pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines dans les zones principalement affectées par les activités agricoles [71]. Ils se diffèrent par leurs poids, qui sont multipliés par la cote DRASTIC pour chaque couche d'entrée, l'indice de vulnérabilité DRASTIC (ID) est déterminé par l'addition des cartes qui ont été réalisées. Les poids attribués de la méthode DRASTIC standard sont allés de 1 à 5, comme indiqué dans le Tableau 11 [59, 96].

Tableau 11 Paramètre et poids de la méthode DRASTIC[93]

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

La méthode DRASTIC a été utilisée dans plusieurs pays à savoir les États-Unis [66, 72], Japon [66], Jordanie [97], Tunisie [98], Iran [99], Nord-Est de l'Algérie [73] et l'Irak [100]. En outre, différents chercheurs ont modifié cette méthodologie pour cartographier la vulnérabilité intrinsèque des aquifères afin d'obtenir une meilleure représentation du milieu hydrogéologique local [101, 102]. La méthodologie proposée pour l'évaluation des eaux souterraines par cartographie des vulnérabilités est basée sur l'organigramme illustré dans la figure 29 [59].



[1] Calcul des valeurs de vulnérabilité pixel par pixel selon la formule de l'indice DRASTIC.

[2] Classification des pixels en fonction des classes DRASTIC

Figure 29 Organigramme présentant l'intégration des sept paramètres retenus par la méthode DRASTIC [80].

4.3.10. Profondeur de la nappe phréatique

Ce paramètre (tableau 12) peut être défini comme la distance entre la surface du sol et la nappe phréatique. Cela a un impact sur le temps nécessaire aux contaminants pour atteindre la nappe phréatique. À mesure que la profondeur augmente, la probabilité de pollution des eaux souterraines généralement diminuée et vice versa [59, 96].

Tableau 12 Cote et poids de profondeur de la nappe phréatique

Profondeur (m)	Cote	Poids
Entre 0 et 1.5	10	
1.5- 4.5	9	
4.5-9	7	
9- 15	5	5
15- 23	3	
23 - 30	2	
Plus de 30	1	

4.3.11. Recharge nette

Selon Qaradaghy, 2015 et Awawdeh, 2010 [59, 96] la recharge nette peut être définie comme l'eau qui passe verticalement de la zone non saturée vers le la zone saturée. Elle représente la différence entre les précipitations totales et le perte total par ruissellement direct ou par évapotranspiration (tableau 13). Les valeurs de la recharge peuvent être calculées à partir de l'équation (6.1).

$$RN= P- ET-R \tag{6. 1}$$

RN : la recharge nette de l'aquifère en mm/ année ;

P : précipitation totale annuelle en mm ;

ET : evatranspiration en mm/année ;

R : les eaux de ruissellement en mm.

Tableau 13 Paramètre de la recharge nette. « RN » [93]

Intervalle (mm/ année)	Côte	Poids
0 – 50	1	
50 – 100	3	
100 – 140	5	
140 – 180	6	4
180-215	7	
180-215	8	
>215	9	

4.3.12. Nature du milieu aquifère

Le milieu aquifère s'identifie par les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, qui sont soit poreux, fracturé ou karstique, elles sont fondamentaux pour déterminer le débit des eaux souterraines et par conséquent la dispersion des contaminants [103]. En général, le milieu grossier (saturé ou insaturé) s'est vu attribuer une valeur de notation élevée par rapport aux types de supports fins et il se réfère aux propriétés du matériau de la zone saturée, qui contrôle les processus d'atténuation des polluants [66]. Une haute perméabilité permet à plus d'eau et à plus de contaminants de se pénétrer dans l'aquifère; et par conséquent à entrainer un taux élevé en matière de vulnérabilité (tableau 14) [62, 63].

Tableau 14 Paramètre du milieu aquifère. « A » [93]

Nature du milieu aquifère	Cote	Poids
Schiste massif	1 – 3	
Roches métamorphiques/ignées	2 – 5	
Roches métamorphiques/ignées altérées	3 – 5	
Lits de grès, calcaire et argile schisteuse	5 – 9	
Grès massif	4 – 9	3
Calcaire massif	4 – 9	
Sable et gravier	6 – 9	
Basalte	2 – 10	
Calcaire karstique	9 – 10	

4.3.13. Milieu du sol

Ce facteur représente la partie altérée la plus élevée de la zone non saturée et les contrôle la quantité de recharge qui peut s'infiltrer vers le bas [66]. Le type et la taille du milieu du sol affectent directement le taux d'infiltration de la pollution [93].

L'attribution d'une côte standardisée pour le type de sol repose essentiellement sur la granulométrie. Une côte élevée reflétant des conditions de haute vulnérabilité est attribuée aux sols caractérisés par les particules grossières.(tableau 15)[104].

Tableau 15 Paramètre de nature du sol. « S » [93]

Nature du sol	Cote	Poids
Sol mince	10	
Gravier	10	
Sable	9	
Argile fissurée	7	
Terre grasse sableuse	6	2
Terre grasse	5	
Terre limoneuse	4	
Terre argileuse	3	
Argile non fissurée	1	

4.3.14. Topographie

La topographie est la variabilité de la pente ou du gradient de la surface du sol [105]. La topographie du terrain a un impact important sur la vulnérabilité des eaux souterraines car la

penne du terrain joue un rôle important pour déterminer si le contaminant rejeté a la capacité de s'infiltrer vers l'aquifère [62]. Cependant, la topographie influence sur le développement du sol (impact sur l'atténuation des contaminants) [61]. Avec une forte pente, le contaminant est plus susceptible à être ruisselle, et donc moins probable de s'infiltrer dans la zone aquifère [62, 106].

Tableau 16 Paramètre de la Topographie. « T » [93]

Intervalle	Cote	Poids
0 – 2	10	
2 – 6	9	
6 – 12	5	1
12 – 18	3	
Plus de 18	1	

4.3.15. Impact de la zone vadose

La zone non saturée comprend l'ensemble des niveaux du sous-sol et du sol situés au-dessus de la nappe. Ces niveaux sont dits «non saturés » car leur porosité ne contient pas seulement de l'eau, mais également de l'air. Cette zone représente la première étape du parcours. Elle est caractérisée par la grande complexité des processus physico-chimiques agissant sur le polluant en particulier dans la zone racinaire (les 30 à 40 premiers centimètres du sol) où se déroule une part importante des processus chimiques et biochimiques. Dans cette zone, les mouvements de l'eau véhiculant le polluant (pour une pollution miscible) sont eux-mêmes complexes, dépendant de la teneur en eau. Celle-ci varie continuellement au cours du temps sous l'influence des cycles pluviométriques et d'infiltration. Ils sont aussi affectés par le degré d'hétérogénéité et le degré de fissuration de la zone non saturée, ce qui déterminera la plus ou moins grande rapidité de la propagation du polluant jusqu'à la nappe (tableau 17)[107].

Tableau 17 Paramètre de l'impact de la zone Vadose « I » [93]

Nature de la zone vadose	Cote	Poids
Couche imperméable	1	
Silt / argile	2 à 6	
Shale	2 à 5	
Calcaire	2 à 7	
Grès	4 à 8	
Lits de calcaire Grès et sable	4 à 8	
Sable et gravier avec passage silt et argile	4 à 8	
Roche métamorphiques/ ignées	2 à 8	
Sable et gravier	6 à 9	5
Basalte	2 à 10	
Calcaire Karstique	8 à 10	

4.3.16. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est la capacité d'un matériau à laisser passer une eau sous l'effet d'une pression. Elle dépend de granulométrie du matériau, la porosité, le gradient et l'interconnexion les espaces vides de l'aquifères [108]. Ce facteur est important car il détermine la vitesse de déplacement d'un contaminant à travers l'aquifère à partir d'un point de contact [109]. La conductivité hydraulique dépend de la perméabilité intrinsèque du matériau et du degré de saturation [110]. Selon le tableau 17 proposé par Aller et al (1985), une vitesse très élevés signifie une vulnérabilité à la contamination et par conséquent une conductivité hydraulique élevée (potentiel de pollution). En revanche une perméabilité lente provoque un potentiel de pollution plus faible (tableau 18). La conductivité hydraulique peut être calculé par l'équation (6.2)[59, 96].

$$C = T / b \quad (6. 2)$$

Dont C est la conductivité hydraulique de l'aquifère (m / jour) , T représente la transmissivité (m² /jour) et b est l'épaisseur saturée de l'aquifère (m).

Tableau 18 Paramètre de conductivité hydraulique « C » [93]

Conductivité hydraulique (m/j)	Cote	Poids
0.04 – 4	1	
4 – 12	2	
12 – 29	4	
29 – 41	6	3
41 – 82	8	
Plus de 82	10	

4.3.17. Indice de vulnérabilité DRASTIC (ID)

La vulnérabilité des eaux de foggara de la région d’Adrar est évaluée au moyen de l’indice DRASTIC qui est un indice numérique représentant la somme pondérée des 7 cotes correspondant aux 7 paramètres définis ci-dessus. L’indice local est obtenu en multipliant la cote de chaque paramètre par son poids relatif et en faisant la somme de ces produits.

$$ID = Dc * Dp + Rc * Rp + Ac * Ap + Sc * Sp + Tc * Tp + Ic * Ip + Cc * Cp \quad (6.3)$$

Dont c et p correspondent respectivement à la cote et au poids du paramètre [111]. L’indice ainsi calculé représente une évaluation du niveau de risque de contamination des eaux de foggara (tableau 19).

Tableau 19 Critère de la vulnérabilité à la pollution de la méthode DRASTIC [93].

Classe de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	< 100
Faible	101-125
Moyenne	126-150
Forte	151-200
Très forte	>200

4.4.Méthodes analytiques des paramètres physicochimiques des eaux des foggaras

Les échantillons ont été prélevés dans différentes parties de foggara (puits peu profonds (1.5m de profondeur) et Seguia). La température, le pH et la conductivité électrique ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un appareil portable multi-paramètres parce que ces paramètres changent considérablement avec le temps. Pour l'analyse chimique, une bouteille en plastique

de 250 ml a été remplie et à chaque localité du système foggara, et elle a été transporté vers le laboratoire de l'ANRH Adrar .

Une analyse des paramètres physiques (pH, Ce, TDS, T) et des éléments chimiques a été effectuée pour les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} et HCO_3^-), le cycle de l'azote (NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+), les éléments mineurs en traces (PO_4^{3-}).

Les analyses sont faites sur les (16) paramètres physicochimiques selon les méthodes standard d'analyse. La température, le pH et la conductivité ont été mesurés in situ, à l'aide d'un pH-mètre couplé d'un thermomètre et un conductimètre de type WTW 315i SET. Le résidu sec a été déterminé après évaporation à 180°C, selon la méthode NF T 90-029, décrite par l'analyse de l'eau, les chlorures sont dosés par la méthode AFNOR NF EN ISO 15682, les sulfates sont dosés par la méthode NFT 90-009, les nitrates par la méthode NFT 90-012, ces paramètres ont été mesurés par des dosages au spectrophotomètre UV visible de type Perkin Elmer Lambda 25 d'après les méthodes décrites en J. Rodier , 2009 [112], les carbonates et bicarbonates sont dosés par acidimétrie selon la méthode NF T90-036, le calcium et le magnésium ont été déterminées selon les méthodes titrimétries dont les principes sont conformes aux normes NF T90-016 et NF T90-003, et le sodium et potassium par la méthode NF T 90-019 au photomètre de flamme de type BWB XP.

4.5.Conclusion

L'utilisation de l'instrument de mesure *chekfa* pour le partage des eaux de système foggara était dans le but de valoriser la méthode traditionnelle de savoir et les savoir-faire des mesureurs d'eau (kiel el ma). Le mode opératoire a permis de dévoiler aux scientifiques et aux techniciens les différentes opérations du calcul des parts d'eau à la réparation des peignes. La fabrication de *chekfa* nécessite une technique spéciale, certaines mesures doit être pris en compte afin d'assurer la conformité entre les orifices appropriés aux unités et leurs fractions. Cela permettra de mieux maîtriser la gestion et la durabilité de système foggara. De point de vue qualité les eaux de foggaras ont risqué d'être pollué par le rejet des activités humaines, face à cet enjeu, nous avons fait appel à la méthode de cartographique DRASTIC afin de déterminer les zones vulnérables à la pollution. Cette méthode nécessite une base des données des ressources en eau de nappe dans la région d'étude, le traitement et l'exploitation des données sont présentés dans le chapitre suivant.

chapitre 5 Résultats et discussions

5.1.Introduction

L'étude du système traditionnel de captages des eaux souterraines (foggaras) nécessite la connaissance de la manière de partage des eaux entre les copropriétaires, qu'elle doit être d'une façon juste. Le débit total de foggara doit être déterminé juste après l'achèvement final des travaux par l'utilisation de l'instrument de mesure *chekfa*. Les valeurs mesurées de débit sont présentées dans le tableau 24.

La base des données obtenue de l'ANRH a permis de déterminer et identifier les classes et la pondération de chaque paramètre nécessaire pour la méthode DRASTIC , établir les cartes thématiques des indices de la vulnérabilité. A ce propos l'utilisation d'ArcGis comme un moyen de simulation des données est très utile.

5.2.Partie I : étalonnage de *chekfa* de la région Tamentit

5.2.1. *Chekfa* de Tamentit (référence 5,5 mm)

L'instrument de mesure la *chekfa* présenté dans la figure 28 a été utilisé pour vérifier la conformité entre la *habba* et ses fraction dans le partager des eaux de foggara appelé *Oarmoul Lkbir* et localisé dans la région de Tamentit wilaya d'Adrar. les débits mesurés de la *habba* et leurs fractions sont tabulés dans le tableau 20.

Tableau 20 Valeurs expérimentales des débits en ml/s

Hauteur de trop plein 40 mm (Tamentit)			Hauteur de trop plein 55 mm(Timimoune)			Symbole locale	Unite locale de debit
Unité de Mesure	Débit mesuré	β	Unité de mesure	Débit mesuré	β		
<i>habba</i> (8 mm)	33	/	<i>habba</i> (11 mm)	93	/	Rien	24 <i>kirate</i>
1/2 <i>habba</i> (6 mm)	19	1,74	1/2 <i>habba</i> (9 mm)	56	1,66		12 <i>kirate</i>
1/3 <i>habba</i> (5 mm)	11	3	1/3 <i>habba</i> (8 mm)	37	2,51		
1/4 <i>habba</i> (4 mm)	8	4,12	1/4 <i>habba</i> (6 mm)	24	3,88	:	6 <i>kirate</i>
1/6 <i>habba</i> (3 mm)	5	6,6	1/6 <i>habba</i> (5 mm)	18	5,1		4 <i>kirate</i>
1/8 <i>habba</i>	/		1/8 <i>habba</i> (4mm)	11	8,45	: :	3 <i>kirate</i>

Pour la validation de ces valeurs (tableau 20) on utilise la méthode d'analyse des variances (équation 5.1) , afin de vérifier l'homogénéité et estimer la relation linéaire entre les valeurs de *habba* et leurs fractions.

$$y = \beta x + \varepsilon \quad (5.1)$$

Dont (ε) est un résidu que l'on espère le plus petit possible, (y) représente le débit fractionnaire correspond aux diamètre de *chekfa* et (x) est la valeur de débit de la *habba* (débit de référence).

5.2.2. Résultat de l'analyse de variance

la méthode de moindre carré montre que le coefficient de détermination (R^2) varie entre 0,98 et 0,99 pour l'ensemble des expériences. Ces valeurs sont proche de 1 ce qui justifie la qualité de l'ajustement par régression linéaire entre les valeurs de débit de *habba* et leur fraction pour les deux instruments du mesure (*chekfa* de Tamentit et celle de Timimoune).

Les valeurs de résidus sont dispersées et elles varient entre (-10^{-3}) et (8.10^3) , l'espérance de ces valeurs est presque nulle ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

Les valeurs β illustrées dans le tableau 24 montrent une conformité acceptable entre la *habba* et sa fraction pour l'ensembles des mesures effectués sur la foggara d'*Oarmoul Lakbir*. Plus le débit écoulé dans la foggara est grand plus que l'écart des erreurs augmente et par conséquent l'utilisation des *chekfas* prises en compte étudiés dans ce travail devient incertain. Et dans ce cas d'autre *chekfa* avec autre caractéristique sont recommandés.

5.3. Partie II : vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara

Dans la présente étude nous avons collecté une base des données composées de 145 puits et forages de l'ANRH antenne d'Adrar. Une partie des ces données est obtenue des archives de l'année 2011, les autres des données ont été collectées durant notre période d'étude 2018 après les campagnes de recensement des forages et de puits implantés dans notre région d'étude (figure 30).

Les données sont traitées par ArcGis version 10.4 dans le but d'élaborer des cartes thématiques des différentes paramètres recommandés par la méthode DRASTIC. Les cartes sont préparées en utilisant la méthode d'interpolation (Inverse Distance Weight (IDW)), après elles sont reclassifié en utilisant la commande « reclassify spatial analyst tool inhérente » à l'outil ArcGis.

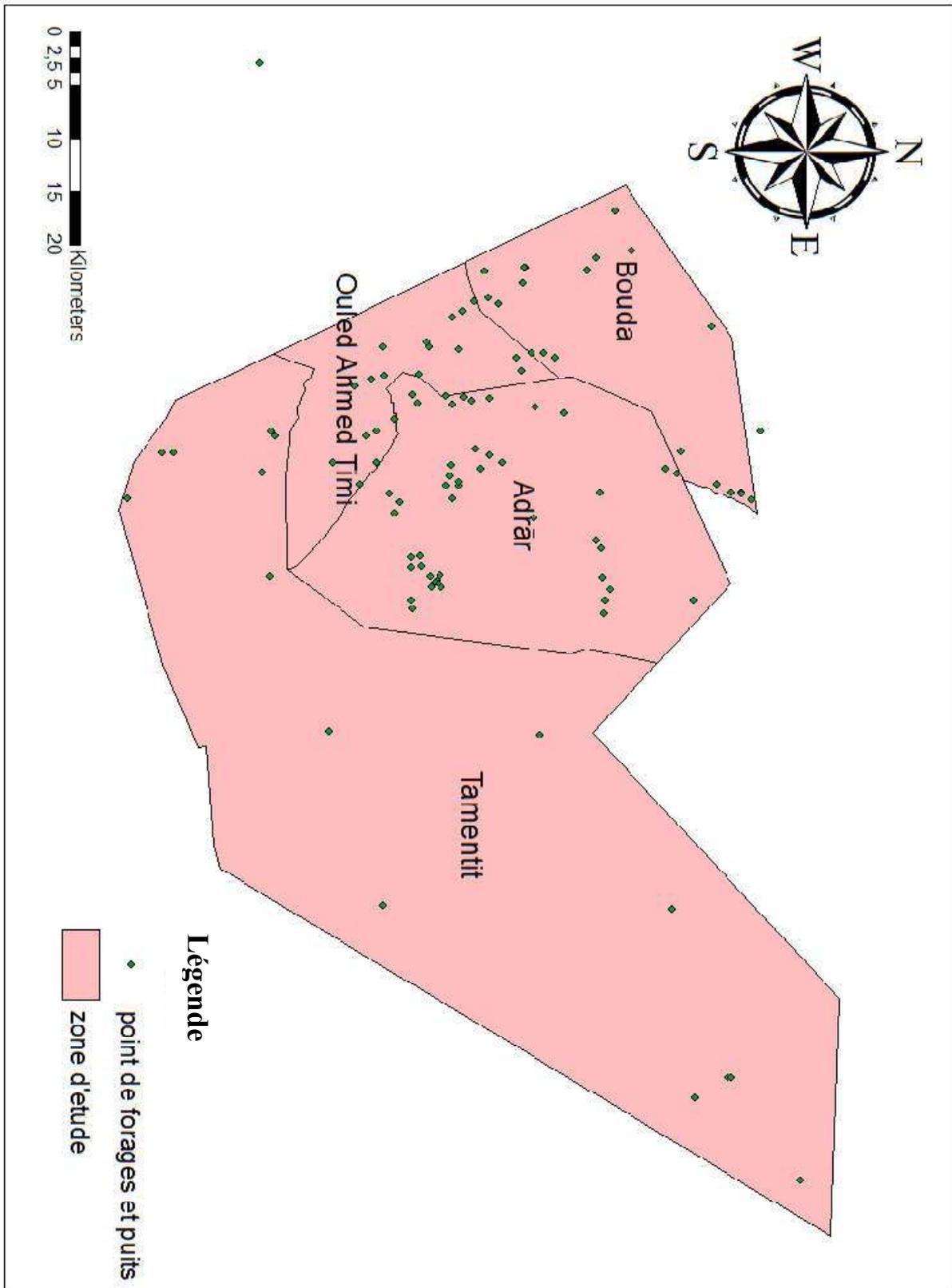


Figure 30 Projection et situation des forages dans la zone d'étude.

5.3.1. Profondeur de nappe

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps à atteindre la surface piézométrique [6]. Pour notre région d'étude l'indice de profondeur est reparti comme le montre le tableau 21.

Tableau 21 Classes et pondération du paramètres de profondeur de nappe

Intervalle (m)	Cote de profondeur	Poids de profondeur	$C_p * P_p$
1.5- 4.5	9	5	45
4.5-9	7	5	35
9- 15	5	5	25
15- 23	3	5	15
23 - 30	2	5	10
Plus de 30	1	5	5

La carte thématique du paramètre de profondeur (figure 31) montre que les plus faibles indices sont repartis dans le Nord Est dans la région de Tamentit pour une valeur de 5 et 10, par contre les plus importants indices sont repartis dans le Nord Est région de bouda avec une valeur 45. Les autres régions leurs indices varient entre 10 et 35.

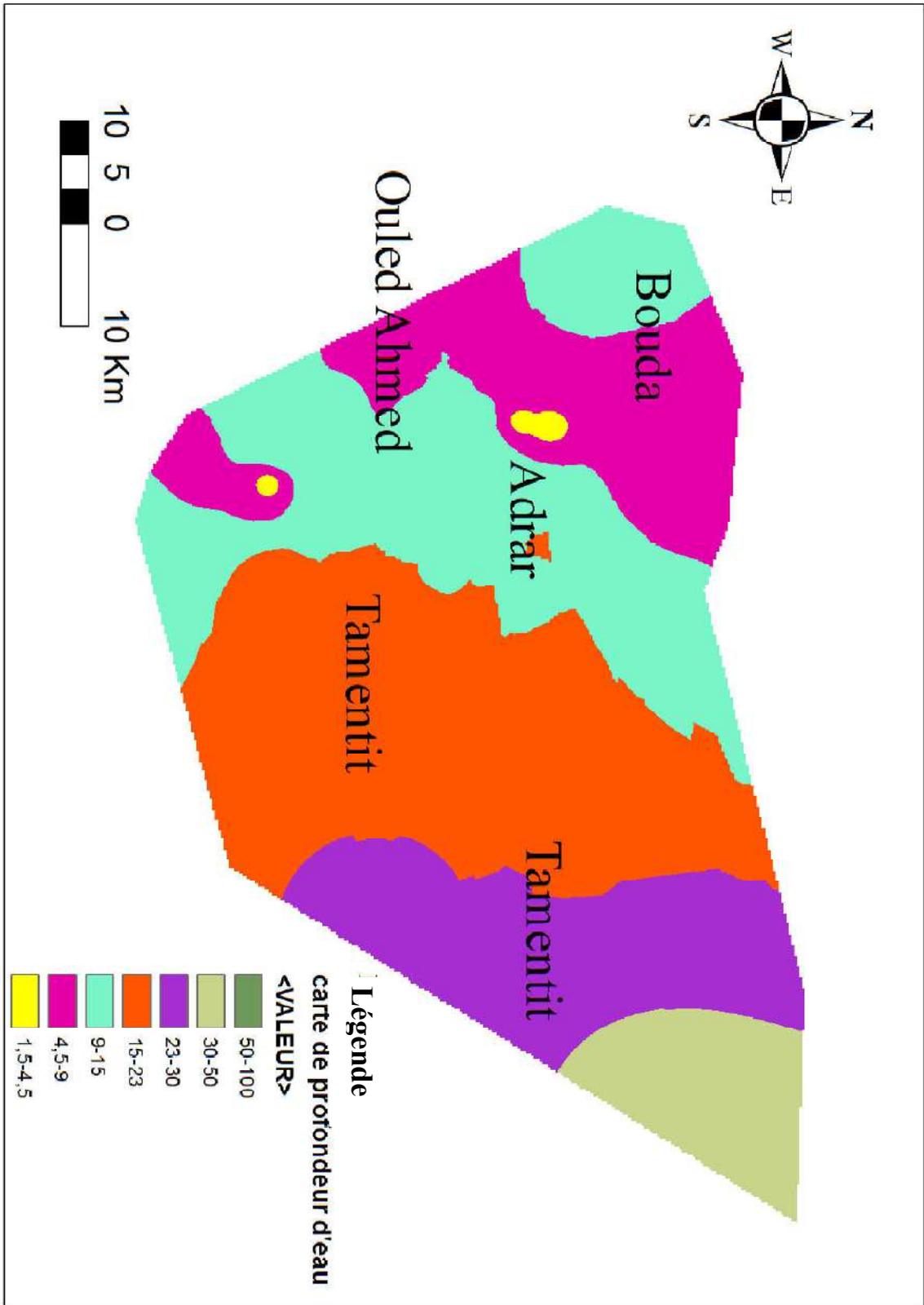


Figure 31 Carte des indices de la profondeur de la nappe CI.

5.3.2. Recharge nette

Notre région d'étude fait partie des zones arides qui sont caractérisées par l'absence totale de la précipitation durant toute l'année, la valeur de ce paramètre est estimé à 2 mm/an (tableau 22).

Tableau 22 Classes et pondération du paramètre de recharge nette

Intervalle (mm/année)	Cote de recharge	Poids de recharge	$C_R * P_R$
0 - 50	1	4	4

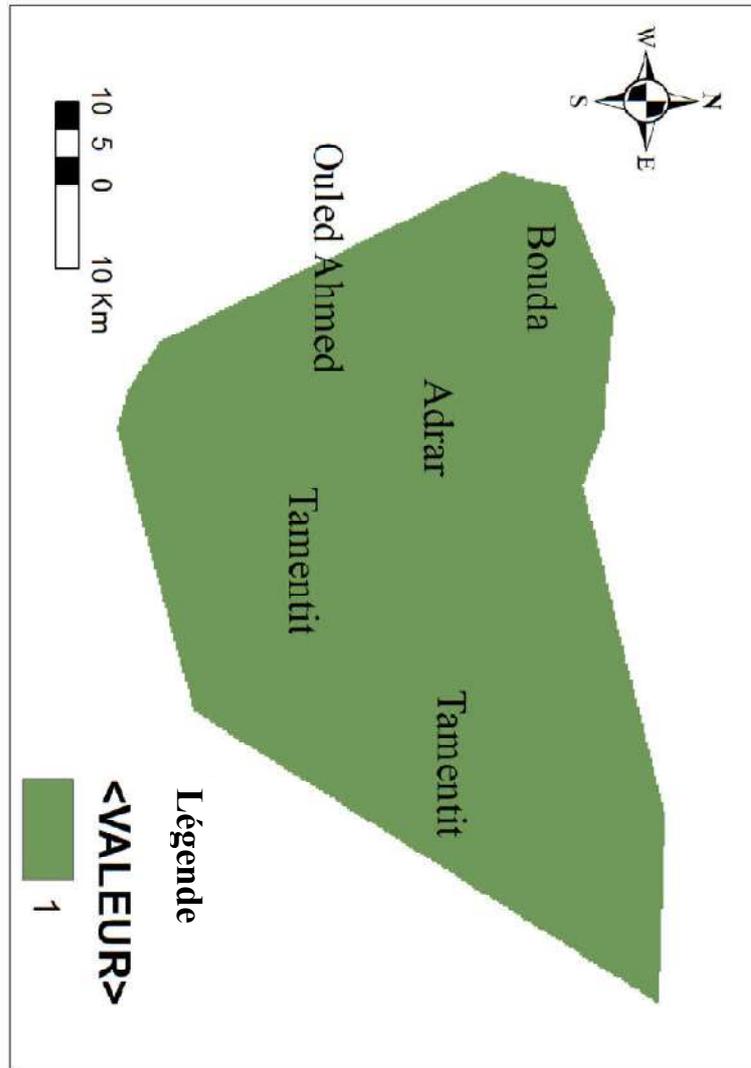


Figure 32 Carte de la recharge nette de la nappe CI.

La carte thématique (figure 32) de la recharge efficace montre une seule classe. La valeur de l'indice est de 4.

5.3.3. Nature du milieu aquifère

Les logs des forages et des puits implantés sur notre région d'étude nous a permis d'identifier la nature du milieu aquifère. Ces logs ont montré que ce paramètre est peut se classer en 5 classes comme le montre le tableau 23.

Tableau 23 Classes et pondération du paramètre de milieu aquifère

Classes	Cote d'aquifère	Poids d'aquifère	$C_A * P_A$
Argile	5	3	15
Calcaire	6	3	18
Gres	7	3	21
Gravier	8	3	24
Sable	9	3	27

La carte thématique (figure 33) du paramètre de milieu aquifère montre que la région d'étude est composée de 5 classes dont l'indice le plus dominant est celle du sable avec une cote estimé à 9 et du gravier avec une cote de 8. Le milieu argileux est moins dominant et prendre une cote de 5. Sur cette base on peut dire que la région d'étude est plus vulnérable à toute source de contamination.

5.3.4. Milieu du sol

Les travaux de pédologie réalisés par INSID (institut national des sol et drainage) et DSA (la direction des services agricoles) wilaya d'Adrar ont permis de faire ressortir le type et la nature des sols. Les classes sont présentées dans le tableau 24.

Tableau 24 Classes et pondération du paramètre de milieu aquifère

Classes	Cote de type de sol	Poids de type de sol	$C_S * P_S$
Argile	7	2	14
Calcaire	7	2	14
Grés	8	2	16
Gravier	9	2	18
Sable	10	2	20

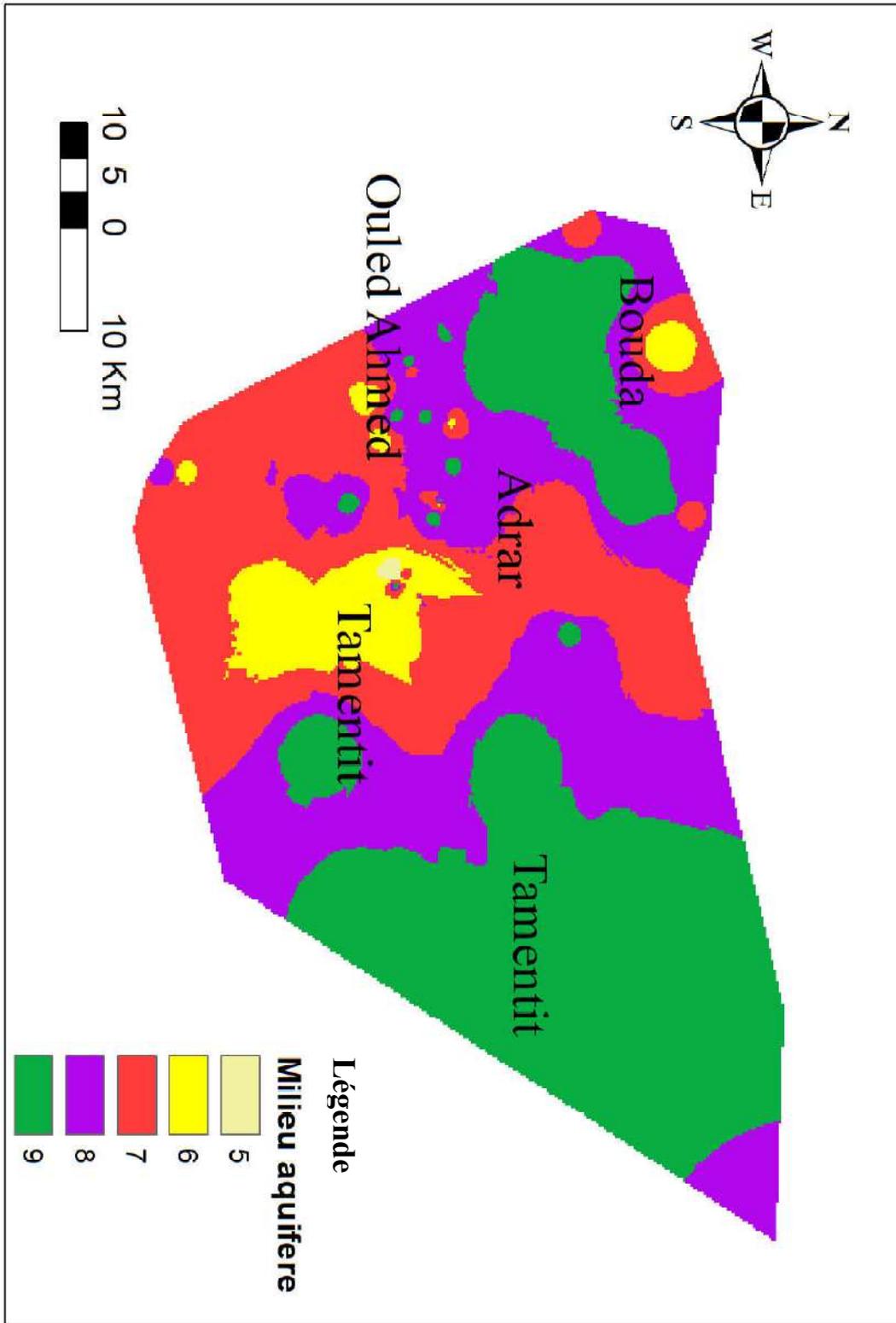


Figure 33 Carte thématique des indices du milieu aquifère CI.

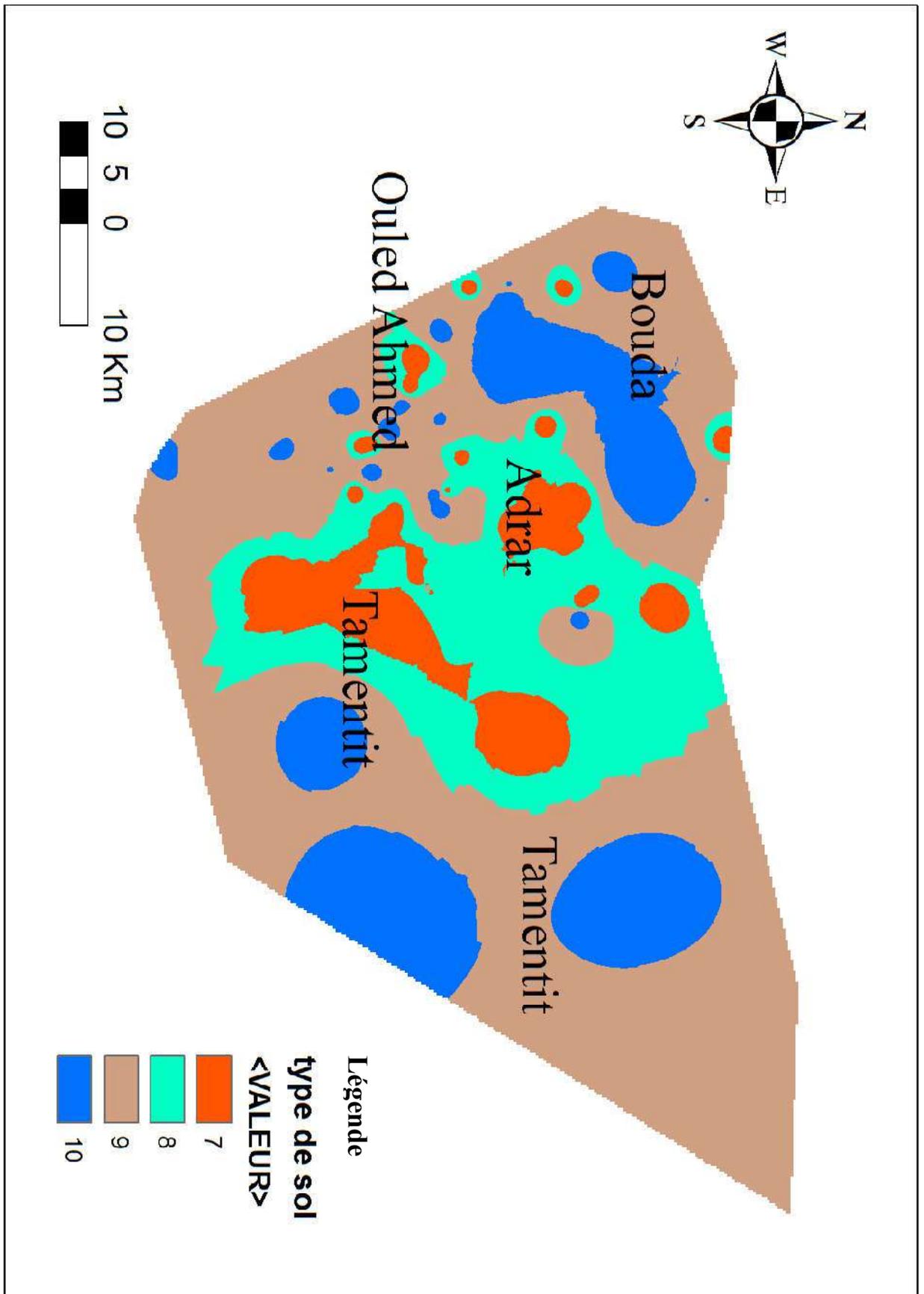


Figure 34 Carte thématique des indices du type de sol.

A partir de cette carte (figure 34) on peut dire que L'indice du paramètre de sol prendre les valeurs 10 (sable), 9 (gravier) et 8 (gres). Les sols est appartient à la classe des sols peu évolués et par conséquent risque de contamination des eaux souterrains (régions de Tamentit, Bouda et Ouled Ahmed) . Dans la partie ou l'argile et plus dominante (classe 7) la probabilité de l'absorption des polluants est plus importante et dans ce cas la protection des eaux de souterraine (foggara) est très grande (région d'Adrar chef lieu).

5.3.5. Topographie

Dans le présent travail, une carte digitalisé de type DEM(Digital Elevation Model) a été utilisée avec une résolution de 15 m afin de calculer et générer la carte thématique.

La commande Slope en ArcGis nous a permis de classifier la carte thématique, cette dernière qui a été reclassifié en utilisant la commande « Reclassify », selon les classes recommandées par la méthode DRASTIC (Tableau 25). la carte thématique de la topographie de la région d'étude est présentée dans la figure 35.

Tableau 25 Classes et pondération du paramètre de la topographie

Classes en %	Cote de topographie	Poids de topographie	$C_T * P_T$
0-2	10	1	10
2-5	9	1	9

Les classes de la topographie dans la région d'étude sont variées entre 0 et 5. D'après la carte thématique établie, environ 75 % des pentes de la région d'étude varie entre 2 et 5 %. Cette pente est faible ce que se signifie une vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara.

5.3.6. Impact de la zone vadose

La géologie des terres (logs) de la région d'étude est permise d'identifier la nature de la zone non saturante. Les classes et leur paramètre de pondération sont illustrés dans le tableau 26.

Tableau 26 Classes et pondération de la nature de zone vadose

Classes	Cote de zone vadose	Poids de zone vadose	$C_I * P_I$
Argile	3	5	15
Calcaire	3	5	15
Gres	6	5	30
Gravier	8	5	40
Sable	8	5	40

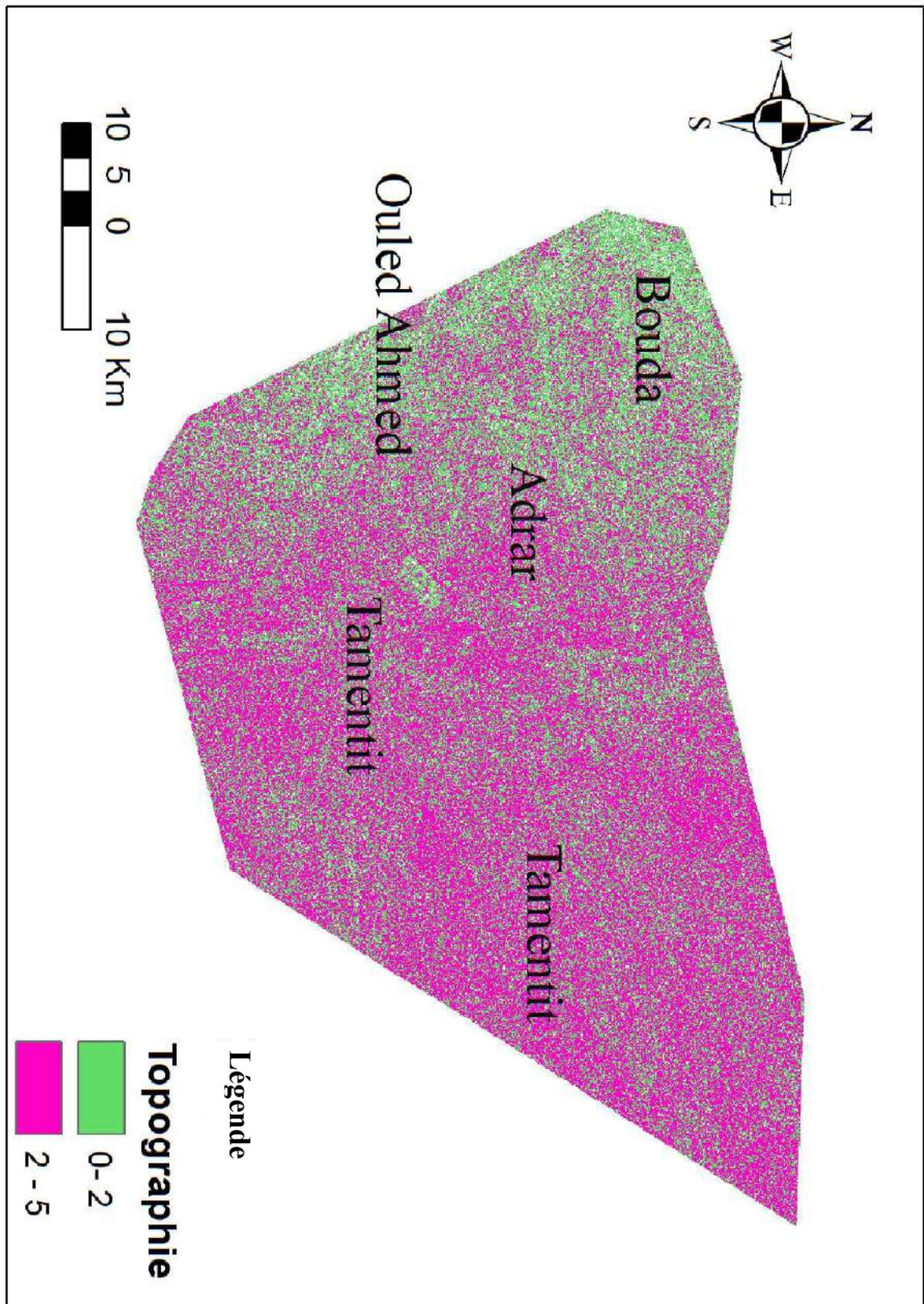


Figure 35 Carte thématique des indices de la topographie de la région d'étude .

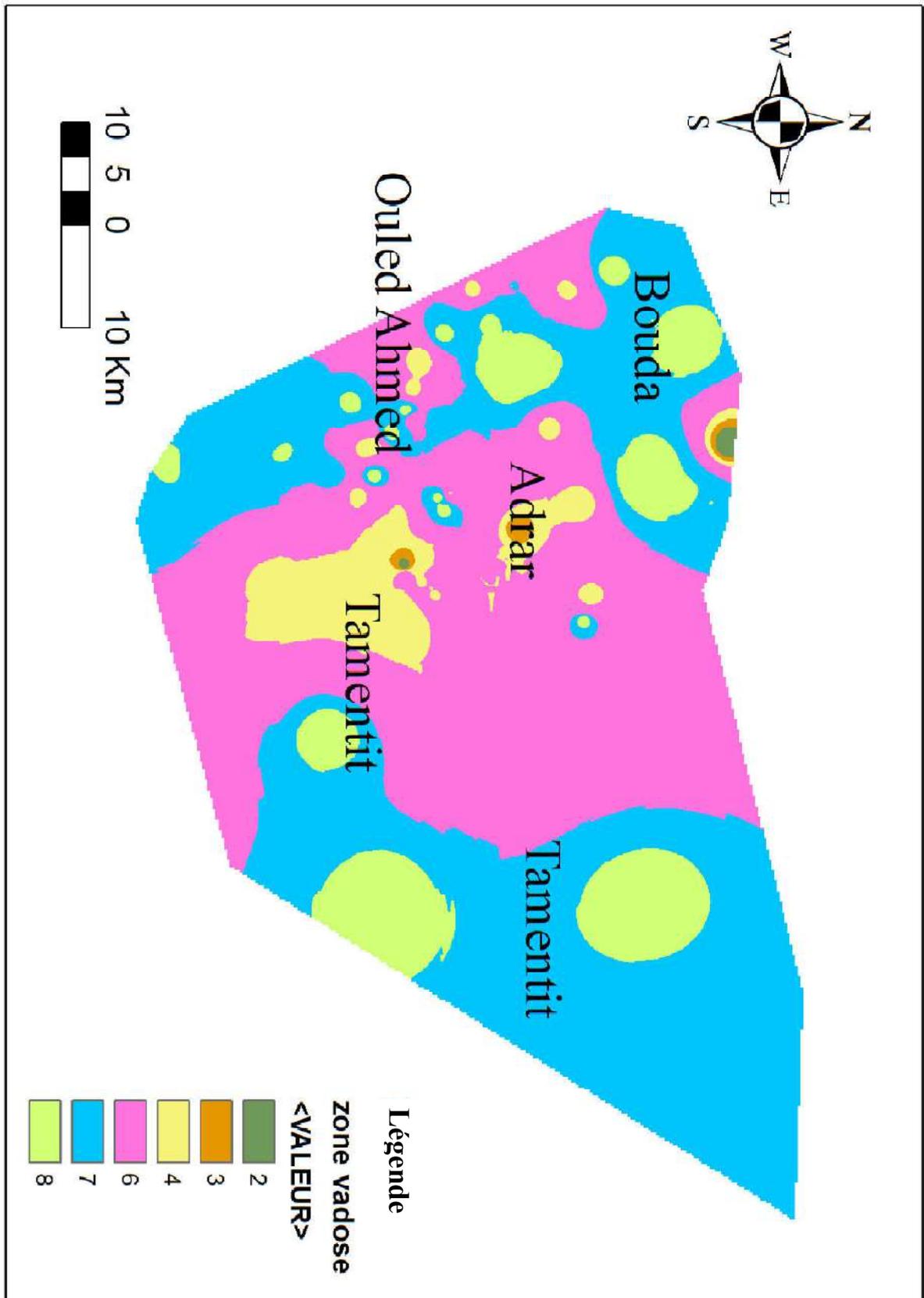


Figure 36 Carte thématique des indices de l'impacte de zone vadose.

L'analyse de la carte thématique (figure 36) des indices de l'impact de la zone vadose présentée dans la figure 38 montre que notre région d'étude est formée de (1) l'argile et de calcaire correspondant au plus faible indice (15). Ce sont des milieux fins caractérisés par sa petite valeur de perméabilité et par conséquent de faible vulnérabilité. (2) Grès, gravier et sable avec qui varie entre 30 et 40 et dans ce cas la vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara est élevée.

5.3.7. Conductivité hydraulique

Les valeurs de la conductivité hydraulique sont obtenues des travaux des essais de pompes qui ont été réalisés dans notre région d'étude. Elles sont présentées dans la figure 37.

Tableau 27 Valeurs de la conductivité hydraulique pour la région d'étude

Conductivité m/J	Cote de la conductivité	Poids de la conductivité	$C_C * P_C$
0,04 - 4	1	3	3

A partir de la carte thématique représentée dans la figure 37 on peut constater que toutes les valeurs de la conductivité hydraulique sont inférieures à 4 m/j. soit un indice de pondération égale 3. Ces valeurs sont faibles et qui conduisent à une faible vulnérabilité à la pollution.

5.3.8. Carte de l'indice de vulnérabilité (carte de synthèse)

Pour établir la carte finale de l'indice de la vulnérabilité, on procède à une intégration des sept 7 cartes thématiques correspondant aux sept 7 indices recommandés par la méthode DRASTIC suivant l'équation 6.3. Et cela en utilisant la commande Calculator Raster d'ArcGis. La carte de la vulnérabilité des eaux souterraines ainsi obtenue est présentée dans la figure 38.

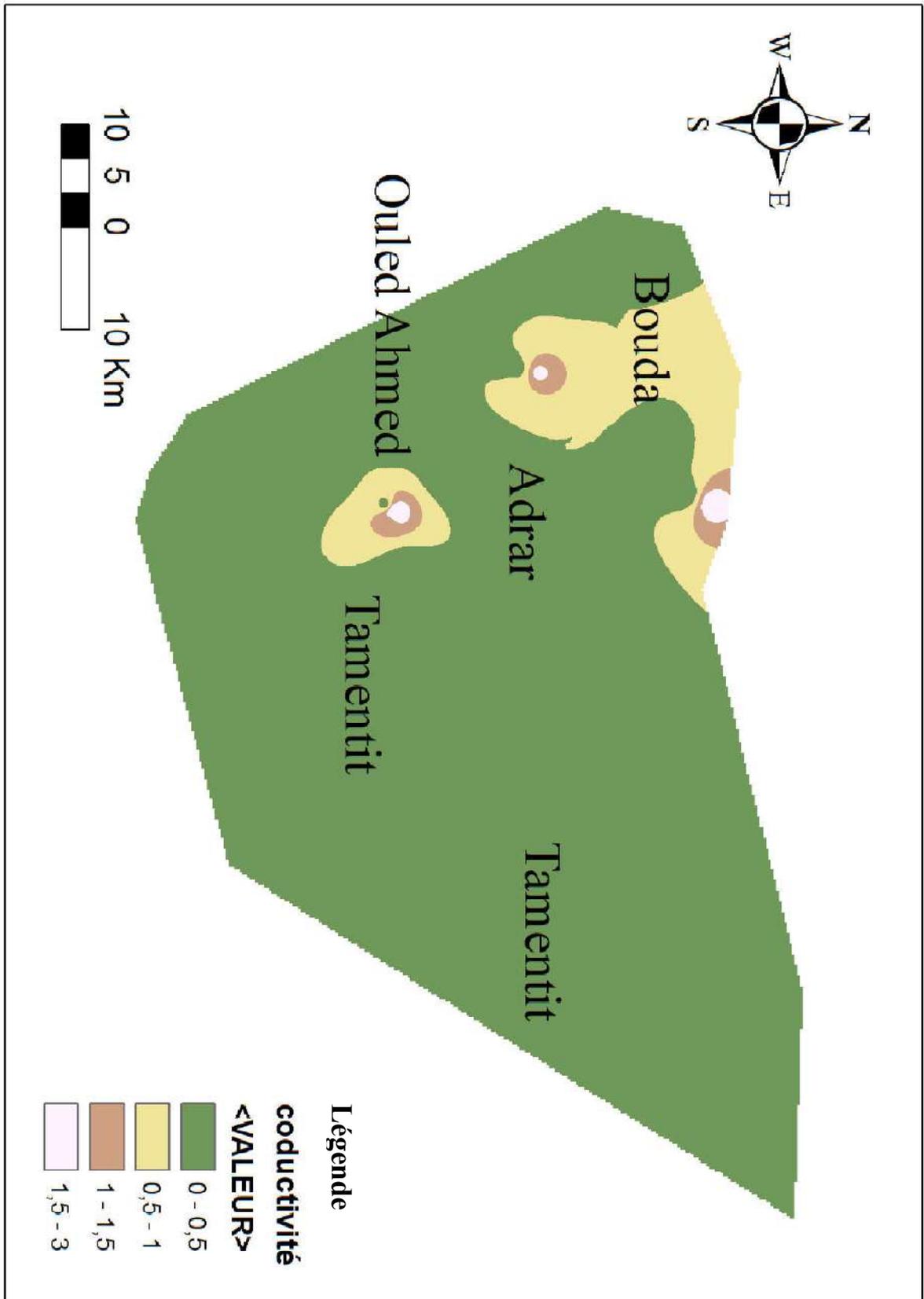


Figure 37 Carte thématique de l'indice de la conductivité hydraulique.

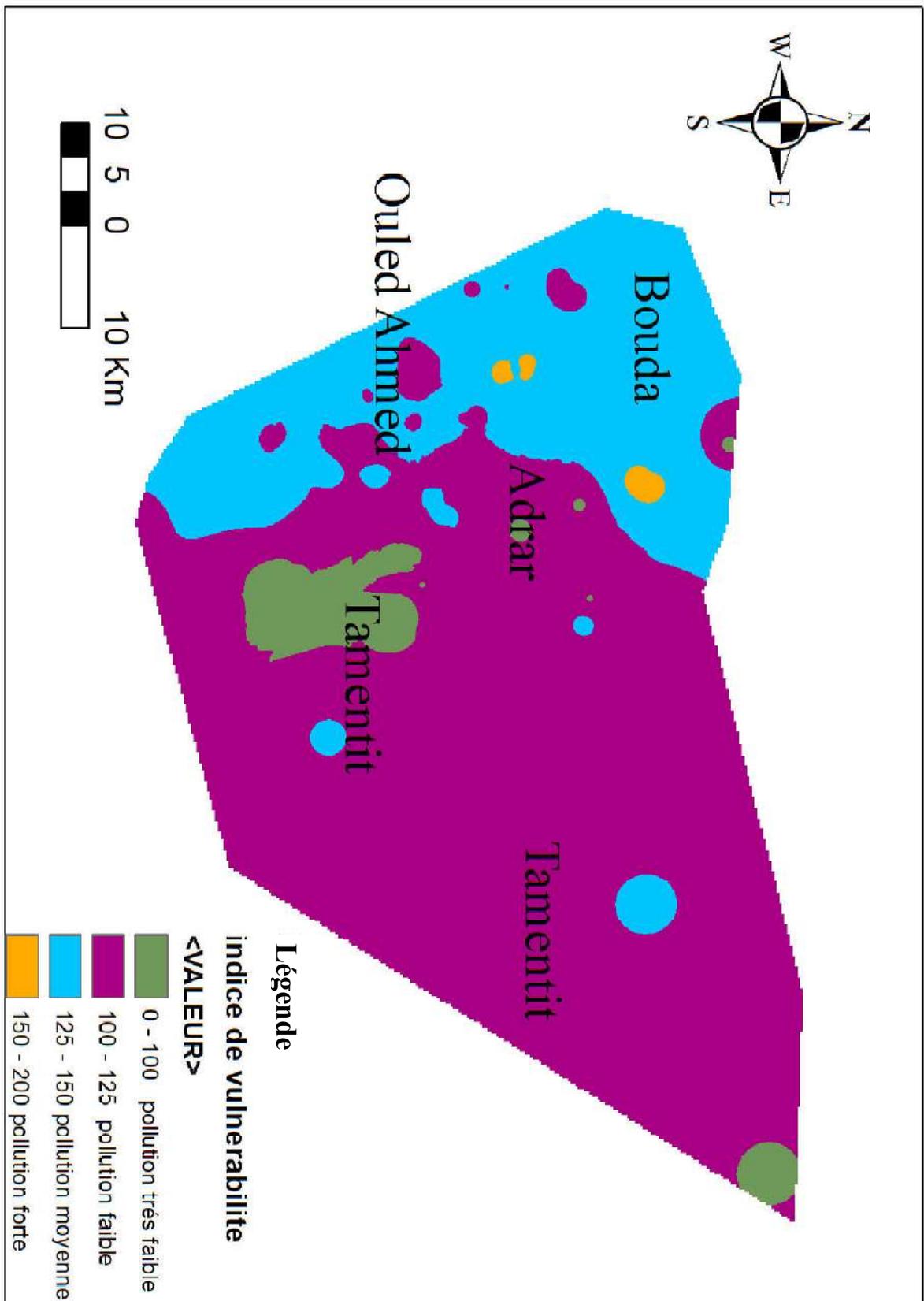


Figure 38 Carte de l'indice de la vulnérabilité en utilisant la méthode DRASTIC dans la région d'étude.

La carte dans la figure 38 montre une variabilité spatiale de l'indice de vulnérabilité à la pollution pour les différentes régions étudiées.

La carte de vulnérabilité DRASTIC révèle quatre (4) classes de vulnérabilité :

Classe très faible vulnérabilité : cette classe occupe une petite partie de la zone d'étude (3,88 %). On peut expliquer cette faible vulnérabilité par l'imperméabilité des formations lithologiques et la forte profondeur de la nappe dans la région de Tamentit.

Classe de faible vulnérabilité : elle occupe une grande partie de la région étudiée (68,23 %). C'est la classe la plus dominante sur la carte réalisée. Cet indice de vulnérabilité peut s'expliquer par la forte pondération des paramètres de protection de la nappe, on parle ici de type de formation des couches du paramètre de l'impacte de la zone vadose et la nature du sol qui sont composés principalement de l'argile et du calcaire (couches imperméables). Cette classe a couvert une grande partie de la région de Tamentit et une partie d'Adrar chef lieu (centre et Nord Est de la région étudiée).

Classe de moyenne vulnérabilité : elle occupe 27,08 % de la superficie étudiée, cet indice est dû à la fois au moyen de la profondeur de nappe et aux paramètres hydrogéologiques (lithologie des couches). Elle est localisée dans les régions de Bouda, Ouled Ahmed et Adrar chef lieu. La protection des eaux souterraines dans cette classe est incertaine.

Classe de forte vulnérabilité : cette classe est localisée dans la région de Bouda avec un pourcentage de 0,81 % de la superficie globale étudiée. La nature de sol est peu évaluée (sable), la profondeur de l'eau est très faible (3 m), le coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique) est fort dans la zone non saturée (zone vadose), tous ces paramètres représentent un facteur essentiels pour l'augmentation de l'indice de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines (CI) qui est la source d'alimentation de système foggara.

Pour valider les résultats obtenus par la méthode DRASTIC on les compare d'une part avec les résultats obtenus par Jaafari [107] qui ont été obtenus par logiciel Mapinfo sur Adrar chef lieu (figure 40) dont ils ont montré pratiquement les mêmes classes de vulnérabilité. Et d'autre part avec les analyses physicochimiques réalisées par l'ANRH (dans les puits de foggara) qui ont été montrés clairement que les puits situés dans les classes moyennes et fortes vulnérabilité ont des concentrations élevées en nitrate en NO_3 [58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Bouda), 67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Adrar) et 18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Ouled Ahmed)], des valeurs importantes en SO_4 (310 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) et un résidu sec de 2050 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (voir section 5.4). Ces valeurs indiquent une mauvaise qualité des eaux de foggara et présentent des indicateurs de pollution, sur cette base on peut dire que les

résultats obtenus par l'application de la méthode DRASTIC sur notre région d'étude sont validés.

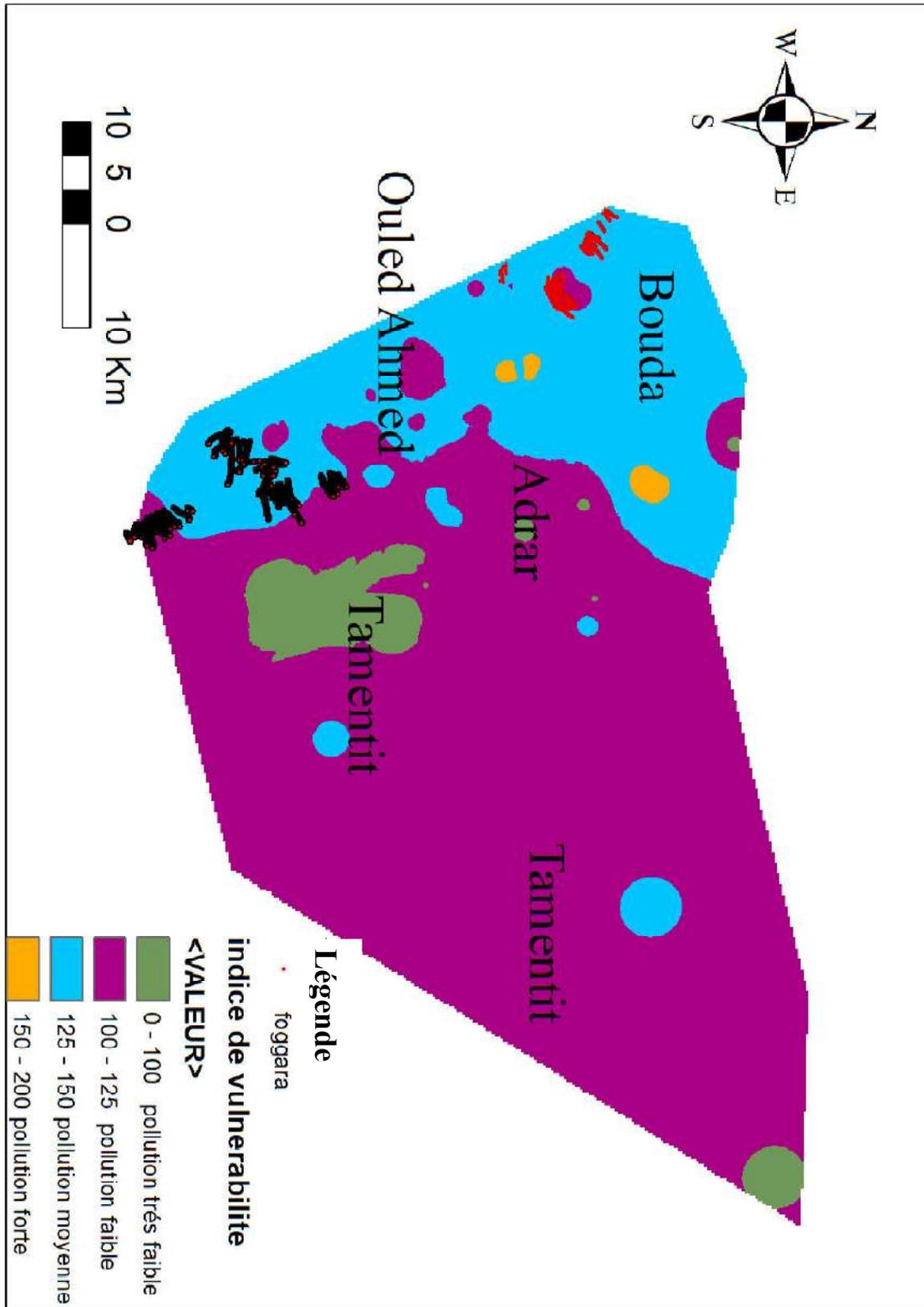


Figure 39 Localisation des foggaras sur la carte d'indice de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

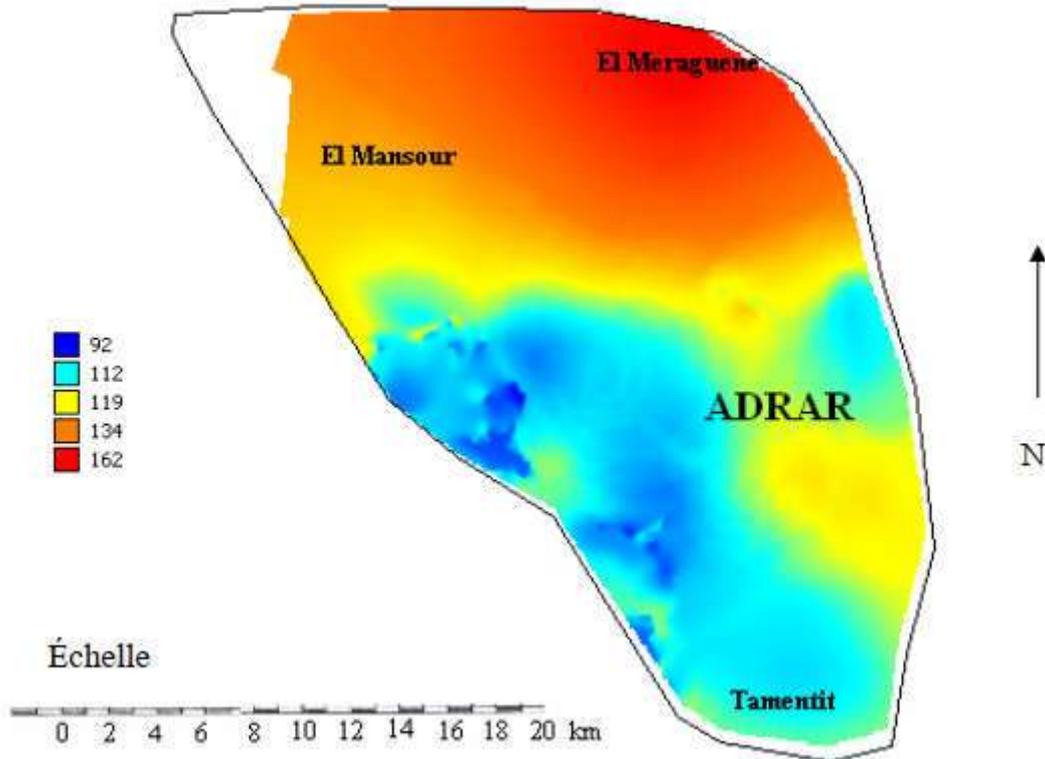


Figure 40 carte de la vulnérabilité a la pollution des eaux souterraine par la méthode DRASTIC [107]

5.4. Hydrochimie des eaux de foggara

La qualité des eaux souterraines et leur adéquation à des fins domestiques, d'irrigation et industrielles est d'une grande importance car elle affecte la vie humaine, influence la gestion de l'eau et la planification future. Ainsi, la qualité est considérée comme plus importante que la quantité, en particulier pour le bassin étudié où le développement rapide de toutes sortes d'activités, en particulier le secteur industriel, fournira des occasions de pollution de diverses sources pour contaminer l'air, la surface et les ressources en eau souterraine.

Les analyses des paramètres physicochimiques des eaux de foggaras (1 foggara par site voir annexe 3) ont été effectuées par l'ANRH Adrar pendant la saison hivernale (mois de décembre) et la saison d'été (fin du mois d'avril) de l'année 2019.

5.5. Propriétés physico-chimiques de l'eau souterraine

Les résultats des analyses de chaque paramètre sont brièvement expliqués et présentés sous forme de tableaux dans les sections suivantes :

5.5.1. Température

Les mesures de température des échantillons d'eau souterraine sont prises immédiatement sur le terrain après le prélèvement des échantillons. Les températures maximales, minimales, moyennes et des échantillons de sources et de puits d'eau sont présentés dans le tableau 28.

Tableau 28 Plage des valeurs de température des échantillons d'eau de foggara , prélevés en Avril 2019.

Température Source	Max	Min	Moye
Seguia	28	21	24
puits	25,5	23	24,5

Des différences significatives de la température sont observées entre les échantillons de l'eau prélevés dans les Seguia et ceux prélevés dans les puits. Une valeur extrêmement élevée (28C°) a été enregistrée dans la seguia de foggara de Tamentit, tandis que la valeur minimale (21C°) a été enregistrée dans la seguia de Ouled Ahmed Timi. En revanche, la valeur la plus élevée de la température de l'eau des puits (25,5C°) a été enregistrée dans la foggara de Bouda, et la valeur minimale (23C°) dans le puits de foggara d'Adrar.

5.5.2. Concentration en ions hydrogène (pH)

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques dans les diagrammes Eh-pH.

Les valeurs du pH des échantillons d'eaux souterraines indiquent que le pH des sources varie entre 7 et 8 (tableau 29).

Tableau 29 Gamme des valeurs de pH des échantillons d'eaux souterraines pour les deux saisons humides et sèches (année 2019).

Saison hivernale				Saison d'été	
seguia		Puits		seguia	puits
intervalle	moyen	intervalle	Moyen	intervalle	moyen
7,60- 8	7,8	7,40-8	7,7	7,0- 7,8	7,4

Comme le montre le tableau 29 , les valeurs de pH en saison humide pour les échantillons de Seguia et de puits sont légèrement supérieures aux valeurs en saison d'été. Le mécanisme de

l'évapotranspiration et l'augmentation considérable de la température en saison d'été peut être la raison de ces cas. Finalement on peut dire que les eaux de foggara sont dans la norme de potabilité.

5.5.3. Résidus sec (TDS)

Comme la température de l'eau, les résidus sec ont été mesurés sur le terrain immédiatement après le prélèvement des échantillons au cours des deux périodes. Les valeurs des résidus sec varient considérablement dans la région, allant de moins de 1800 mg/l à plus de 3148 mg/l (tableau 30). En général, les valeurs des résidus sec en saison humide pour tous les échantillons sont légèrement supérieures aux valeurs en saison sèche. En ce qui concerne les échantillons de Seguia la valeur maximale du résidus sec était de 3148 mg/l enregistrée dans les foggaras localisées dans la région de Bouda, et le minimum est de 1781 mg/l enregistré dans la puits de foggara de Tamentit.

Les valeurs de TDS dominantes dans les deux saisons montrent des valeurs supérieur à 1774 mg/l (annexe 3) vers une valeur maximale de 3143 mg/l pour l'ensemble des puits. Il convient de mentionner que cette valeurs maximales pour les échantillons de puits est enregistrées dans le village de Bouda l'eau de foggara est riche par le chlorure sodique.

Tableau 30 Gamme des valeurs de TDS en mg/l des échantillons d'eaux souterraines pour les saisons humides et sèches (année 2019)

Saison hivernale				Saison d'été			
Seguia		Puits		Seguia		Puits	
Intervalle	Moyen	intervalle	moyen	intervalle	moyen	intervalle	Moyen
1774- 3148	2461	1774-3148	2461	1781- 3148	2464,5	1781- 3148	2464,5

Dans l'ensemble, tous les échantillons d'eau de foggara de la région d'étude sont classés comme étant des eaux non douces, parce que la valeur du TDS est supérieur à 1500 mg/l selon les normes de potabilité de l'OMS.

5.5.4. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique de l'eau représente sa capacité à laisser les charges électriques se déplacer librement. Elle dépend de la quantité des sels dissous (minéralisation). Elle est donnée en $\mu\text{.mho/cm}$ à 25 °C.

Les conductivités électriques mesurées à différentes périodes (hivernale et été), présentent une grande amplitude de variation et évolution d'une foggara a une autre.

La conductivité électrique (CE) des eaux de foggara varie entre 2860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 5070 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La valeur maximale de la conductivité électrique (5070 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a été enregistré dans la région de Bouda cette zone a une forte salinité (la norme de potabilité est fixée à 2,8 mS/cm).

5.5.5. Dureté totale :

5.5.6. Les éléments majeurs

1. Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+)

a. Le Calcium (Ca^{++})

Les valeurs obtenues pour cet élément au niveau des puits et des seguia des foggaras varient entre 156 et 324 mg/l, dont la valeur maximale (324 mg/l) est observée au niveau de Seguia de Bouda. Ces valeurs sont justifiées par le fait de la dissolution des formations carbonatées, calcite (CaCO_3), dolomie [$(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$] ou bien la dissolution des formations évaporitiques, gypse [$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$] et anhydrite (CaSO_4). 80% de ces valeurs de calcium dépassent les normes de potabilité fixée à 200 mg/l.

b. Le Magnésium (Mg^{++})

Les teneurs du magnésium (Mg^{++}) obtenues au niveau des foggaras de la région d'étude varient entre 70 et 183 mg/l. La valeur maximale a été enregistrée dans la seguia de foggara de Bouda. Cette valeur est souvent présente dans les roches évaporitiques (sel de Mg), la carnallite ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), la kiesérite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), et carbonatés, la dolomie [$(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$] de la nappe qui alimente la foggara (la norme de potabilité est fixée à 150 mg/l).

c. Sodium Na^+

Les valeurs du sodium (Na^+) varient entre 250 et 720 mg/l dont la valeur maximale du sodium (Na^+) est localisée au niveau de puits de foggara de Bouda et Adrar chef lieu. Par contre la valeur minimale a été enregistrée au niveau de Seguia de foggara de Tamentit. Les teneurs dans la région sont très élevées et indiquent que les eaux des foggaras sont contenues dans des formations salifères qui dépassent largement les normes algériennes fixées à 200 mg/l.

d. Potassium (K^+)

La concentration du potassium (K^+) au niveau des forages varie entre 28 et 46 mg/l. La valeur maximale est observée au niveau des foggaras de région de Bouda. la valeur minimale a été enregistrée dans les foggaras de Tamentit et Ouled Ahmed. Ces fortes de teneurs en potassium peuvent être observées dans les eaux des formations argileuses et dans les eaux ayant traversées des formations évaporitiques riches en sylvite (KCl) (la norme de potabilité est fixée à 12 mg/l).

2. Les anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2})

a. Les chlorures (Cl^-)

Les teneurs en chlorures (Cl^-) des eaux de foggaras varient entre 495 et 812 mg/l dont la valeur maximale a été enregistrée au niveau de Seguia de Bouda. La valeur minimale a été observée au niveau de foggara de Tamentit. La présence de (Cl^-) dans l'eau souterraine résulte de la dissolution des sels naturels par la dissolution de la sylvite (KCl) et de l'halite (NaCl) (la norme de potabilité est fixée à 500 mg/l).

b. Les Bicarbonates (HCO_3^-)

Les ions bicarbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux chargées en gaz carbonique lors de son l'infiltration dans le sous sol.

Dans la région d'étude la teneur des bicarbonates (HCO_3^-), des eaux de foggara présente des valeurs variant entre 79 et 232 mg/l. Le maximum est enregistré au niveau de foggara de Bouda, et le minimum est enregistré au niveau de foggara de Tamentit.

c. Les sulfates (SO_4^{-2})

Les concentrations des sulfates (SO_4^{-2}) des eaux de foggara varient entre 539 à 1530 mg/l ou La valeur maximale est observée au niveau des foggaras de Bouda et la valeur minimale est enregistrée au niveau des foggara de Tamentit (la norme de potabilité est fixée à 400 mg/l).

d. Nitrate (NO_3^-)

Le nitrate est présent dans la plupart des échantillons des eaux de foggara. Il varie entre 60 et 70 mg/l avec une valeur médiane de 65 mg/l. Des concentrations extrêmement élevées ont été trouvées dans les échantillons de puits de foggara de Bouda, Ouled Ahmed et Adrar. La valeur minimale est enregistré dans les foggaras localisé dans la commune Tamentit (la norme de potabilité est fixée à 1500 mg/l).

5.5.7. Les éléments mineurs

Les nitrites (NO_2^-), L'azote ammoniacale (NH_4^+), Les phosphates (PO_4^-)

Ces éléments sont disponibles avec quelques traces 0,1, 0,06 et 0,5 respectivement.

5.6. Interprétation des analyses chimiques

L'interprétation des analyses chimiques a pour but d'établir la genèse et l'origine des éléments chimiques et d'identifier d'éventuels problèmes de pollutions, (Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^-) [80].

Plusieurs méthodes de classification des eaux naturelles ont été définies par divers auteurs. Des données d'analyse ont été obtenues à partir des archives de l'agence nationale de ressource hydraulique Antenne Adrar sur les eaux de foggaras (année 2011), ces données ont permis de tracer le diagramme de Piper (figures 27,28,29,30 et 31) et la matrice de corrélation (tableau 12) dans chaque région d'étude.

5.6.1. Diagramme de Piper

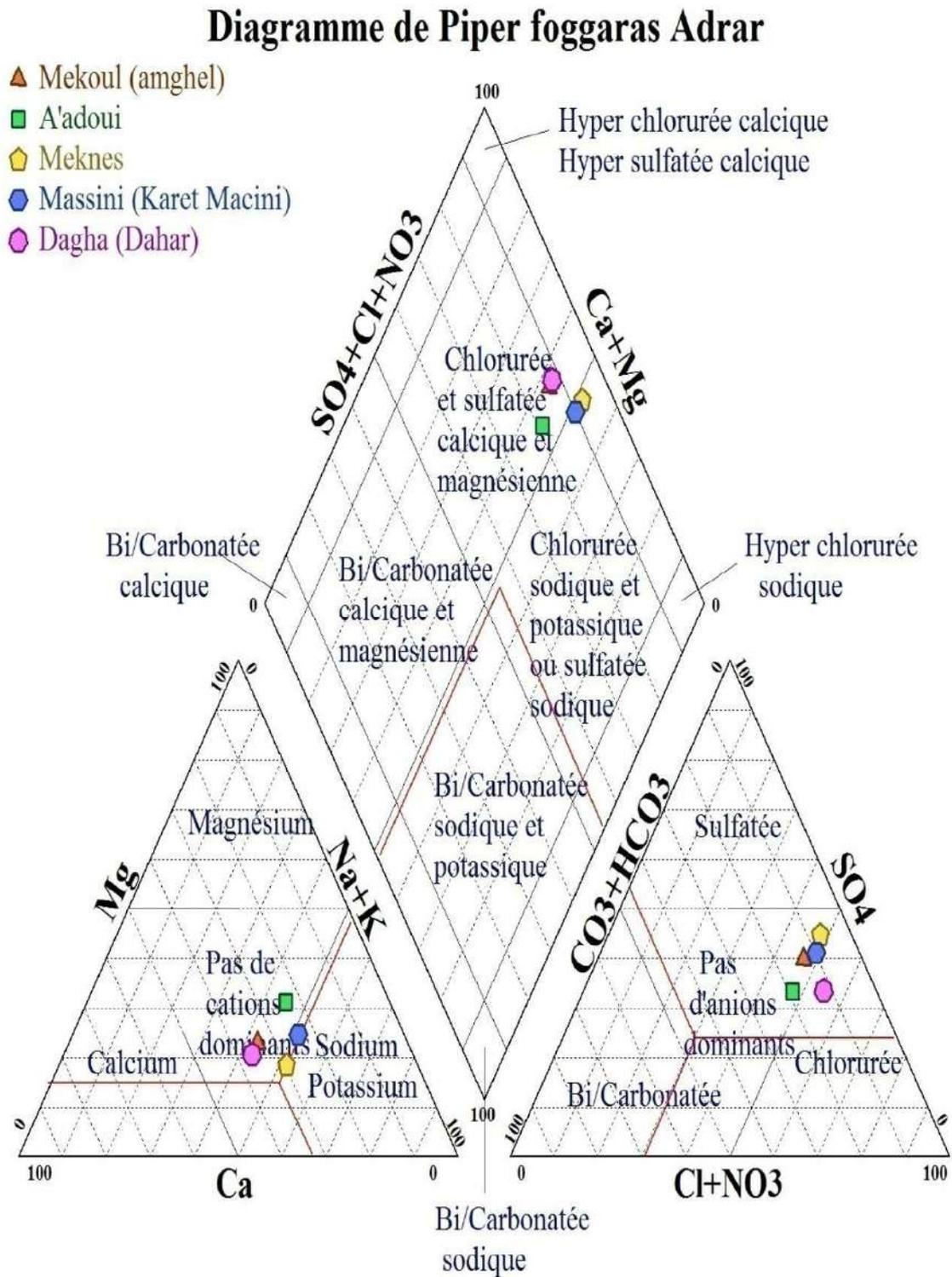


Figure 41 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune d'Adrar (année 2011)

Diagramme de Piper foggras Bouda

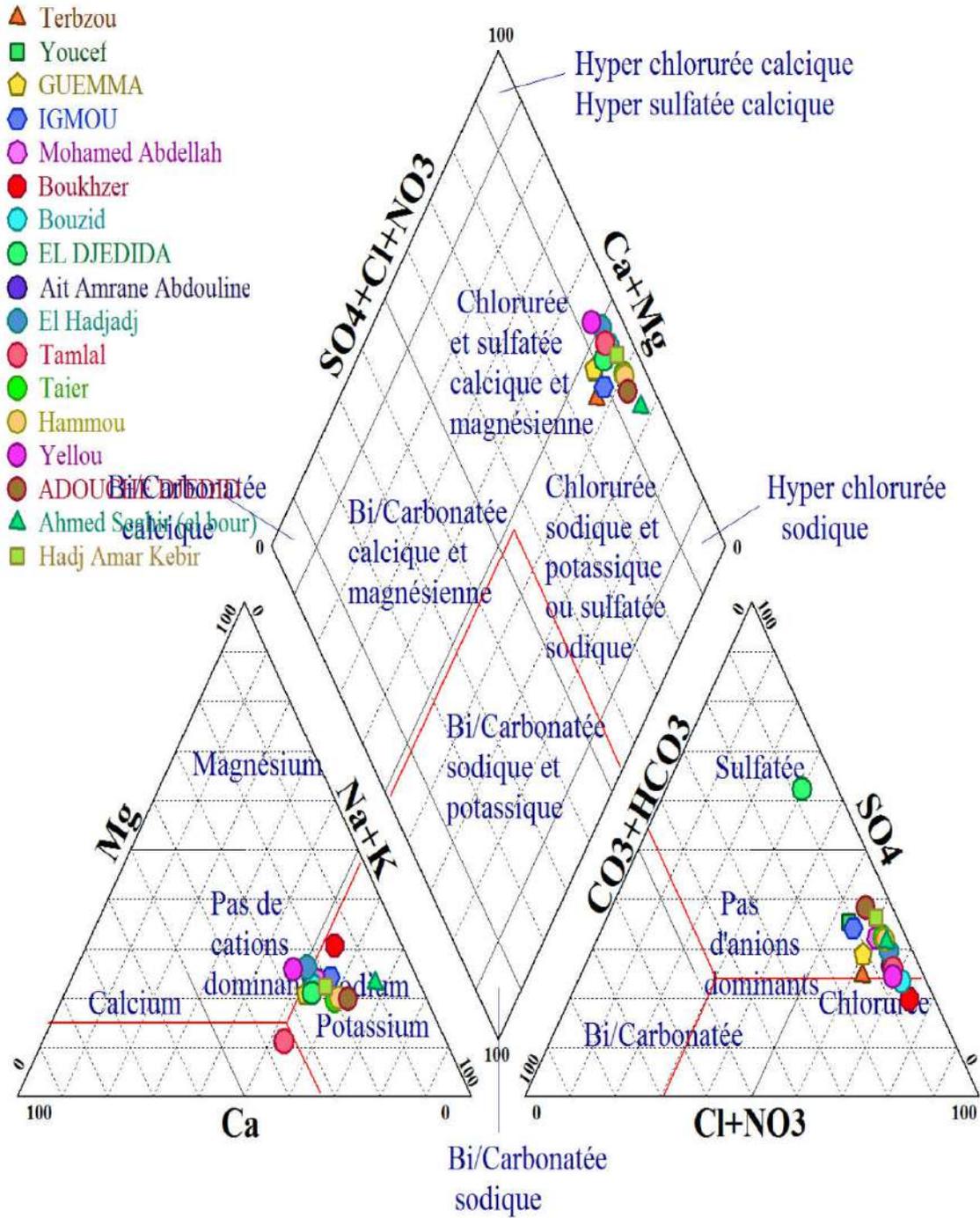


Figure 42 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Bouda (année 2011).

Diagramme de Piper fogaras Timi

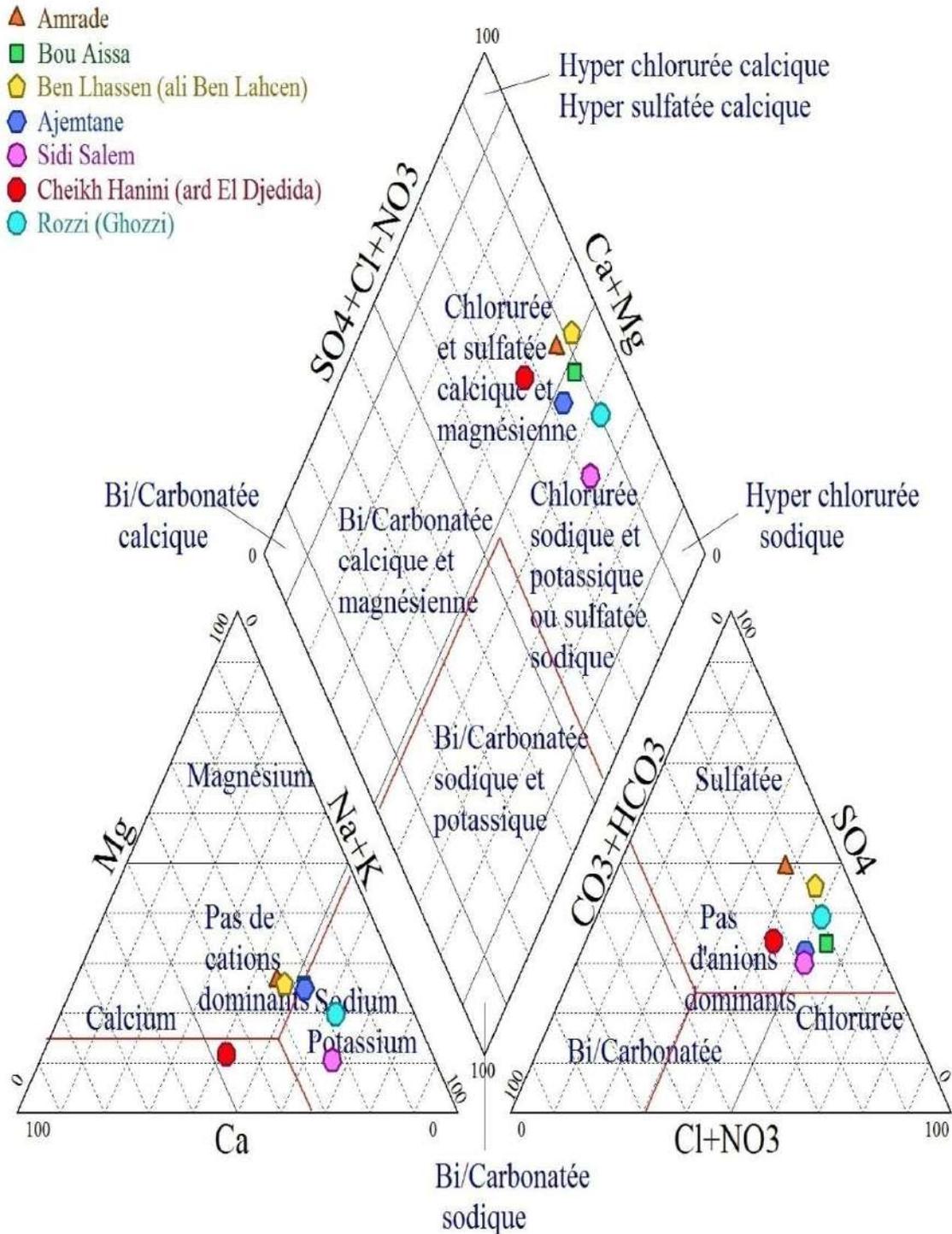


Figure 43 Diagramme de Piper des eaux des fogaras de la commune de Timi (année 2011).

Diagramme de Piper foggaras Tamentit

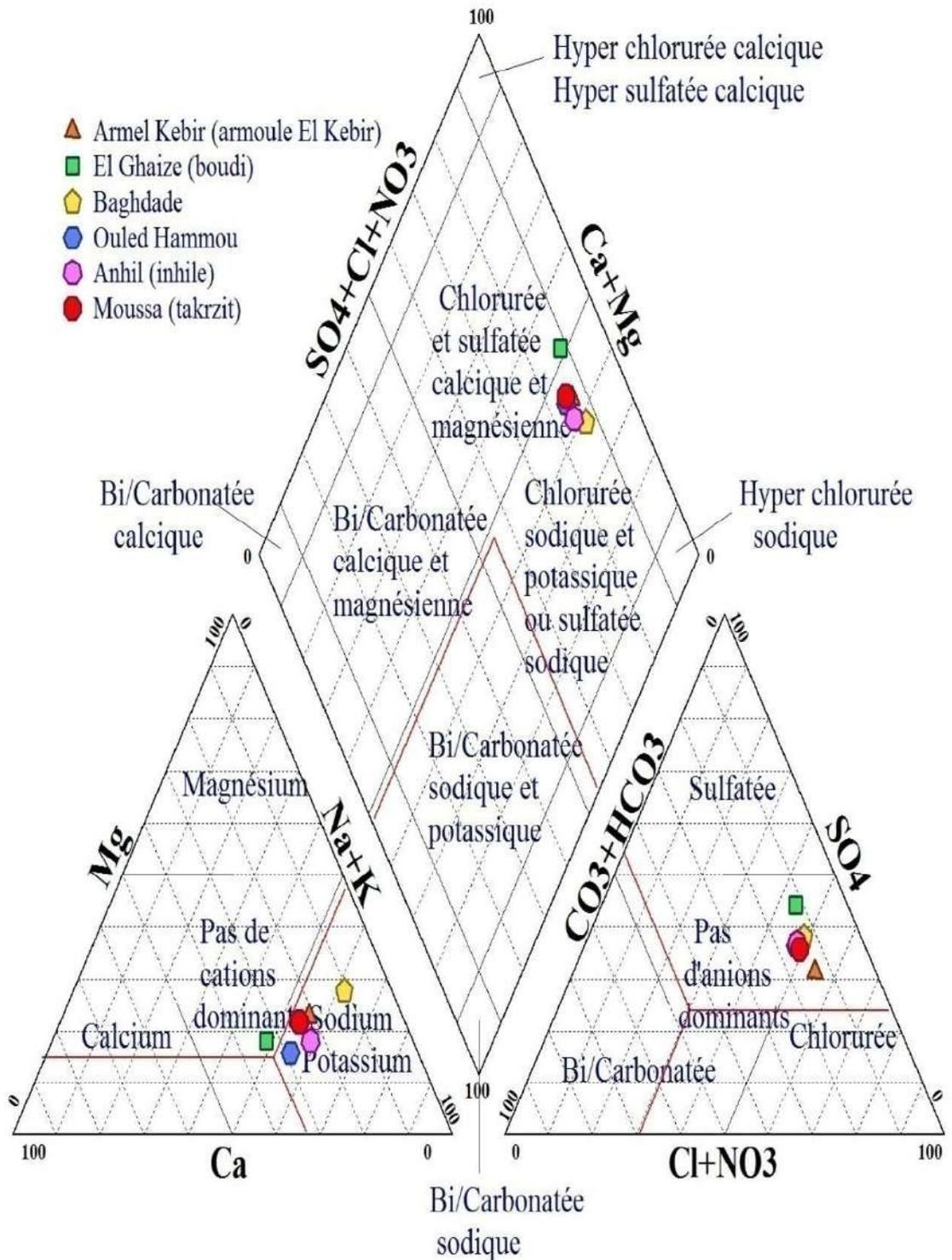


Figure 44 Diagramme de Piper des eaux des foggaras de la commune de Tamentit (année 2011).

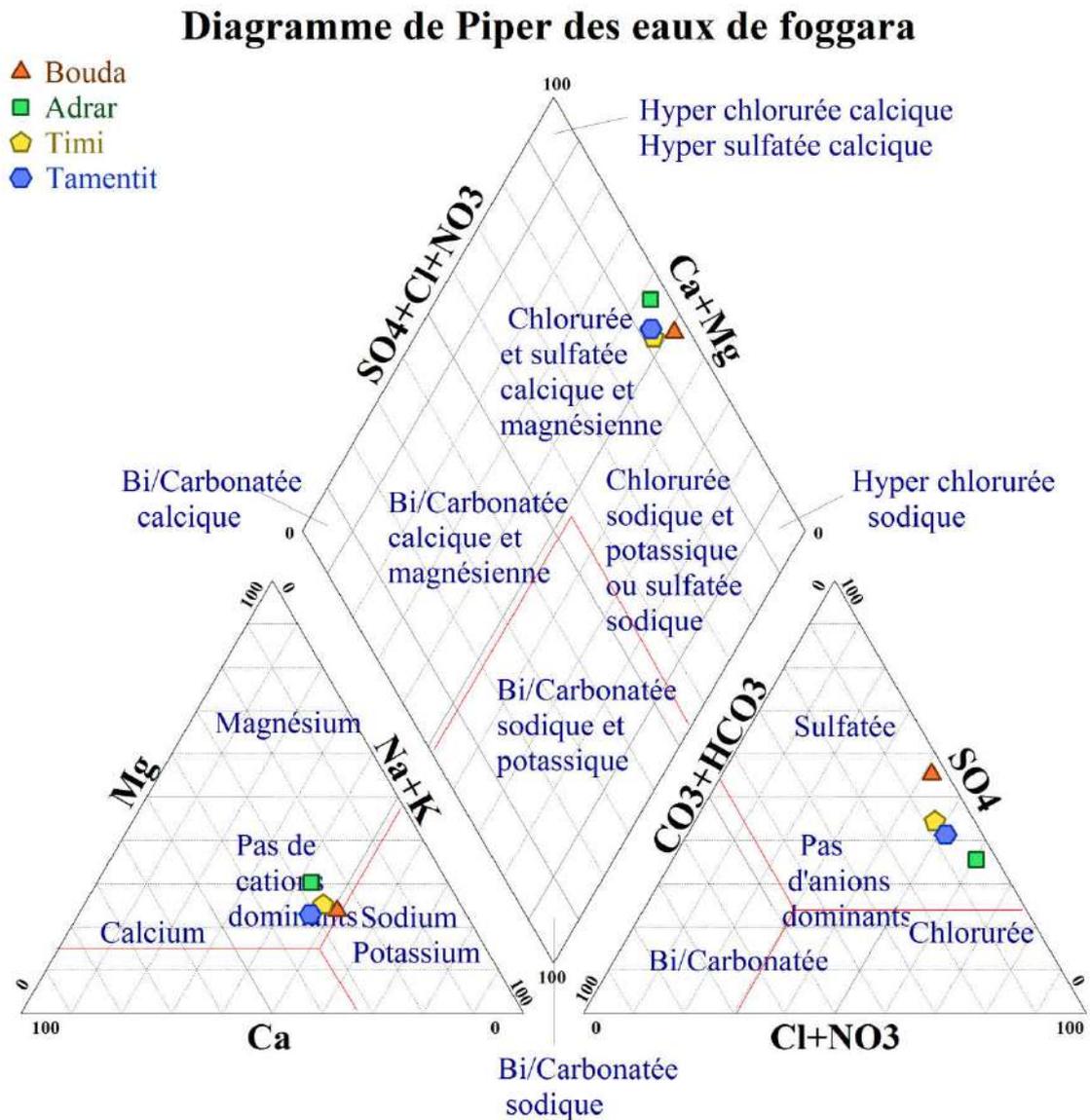


Figure 45 Diagramme de Piper des eaux de foggaras (année 2019 voir annexe 3).

L'analyse de diagramme de piper présenté dans la figure 45 montre que les eaux de foggara de Bouda appartiennent aux faciès chimiques chlorurée sulfatée calcique et magnésienne, ceci s'explique par la dissolution des formations évaporitiques dans la région concernée est responsable des fortes teneurs du résidu sec des eaux. En revanche les eaux de foggara de region de Tamentit, Ouled Ahmed et Adrar sont appartiennent aux faciès chimiques chlorurée calcique et magnésienne.

5.6.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

(ACP) est une méthode très efficace pour l'analyse de données quantitatives, elle permet d'analyser les corrélations entre les variables et d'identifier des états se différenciant fortement des autres.

Une fois les variables sélectionnées, le calcul de la matrice des corrélations permet d'analyser les relations bilatérales existant entre les différentes variables retenues (annexe 3).

Tableau 31 Matrice des corrélations entre les 10 variables retenues

Variables	pH	Ce	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
pH	1									
Ce	0,182	1								
Ca ⁺²	0,269	0,995	1							
Mg ⁺²	0,083	0,973	0,948	1						
Na ⁺	0,217	0,989	0,994	0,928	1					
K ⁺	0,072	0,907	0,872	0,978	0,834	1				
Cl ⁻	0,343	0,931	0,924	0,956	0,880	0,959	1			
SO ₄ ⁻²	0,280	0,966	0,983	0,881	0,993	0,770	0,843	1		
HCO ₃ ⁻	-0,200	-0,229	-0,191	-0,408	-0,093	-0,586	-0,549	-0,014	1	
NO ₃ ⁻	-0,629	0,627	0,547	0,722	0,565	0,717	0,510	0,483	-0,201	1

La matrice (tableau 31) permet d'observer la relation positive forte entre les variables Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, k⁺, SO₄⁻² et Cl⁻ (minéralisation forte). Toutes ces corrélations entre les variables vont conditionner la composition des axes factoriels dont le sens et la signification s'interpréteront en fonction de leur corrélation avec chaque variable.

La lecture pour chacun des facteurs retenus des corrélations avec les 8 variables permet ensuite de déterminer leur signification concrète.

Tableau 32 Variance totale expliquée (valeurs propres)

	F1	F2	F3
Valeur propre	7,124	1,635	1,242
Variabilité (%)	71,238	16,346	12,416
% cumulé	71,238	87,584	100,000

Les valeurs propres de la matrice de corrélation permettent de mesurer le pourcentage de la variance expliquée par chaque factoriel (Tableau 32). Ce tableau des valeurs propres montre que le premier plan factoriel, constitué des axes F1 et F2, représente 87,58 % de l'information. Il se révèle suffisant pour traduire l'essentiel de cette information.

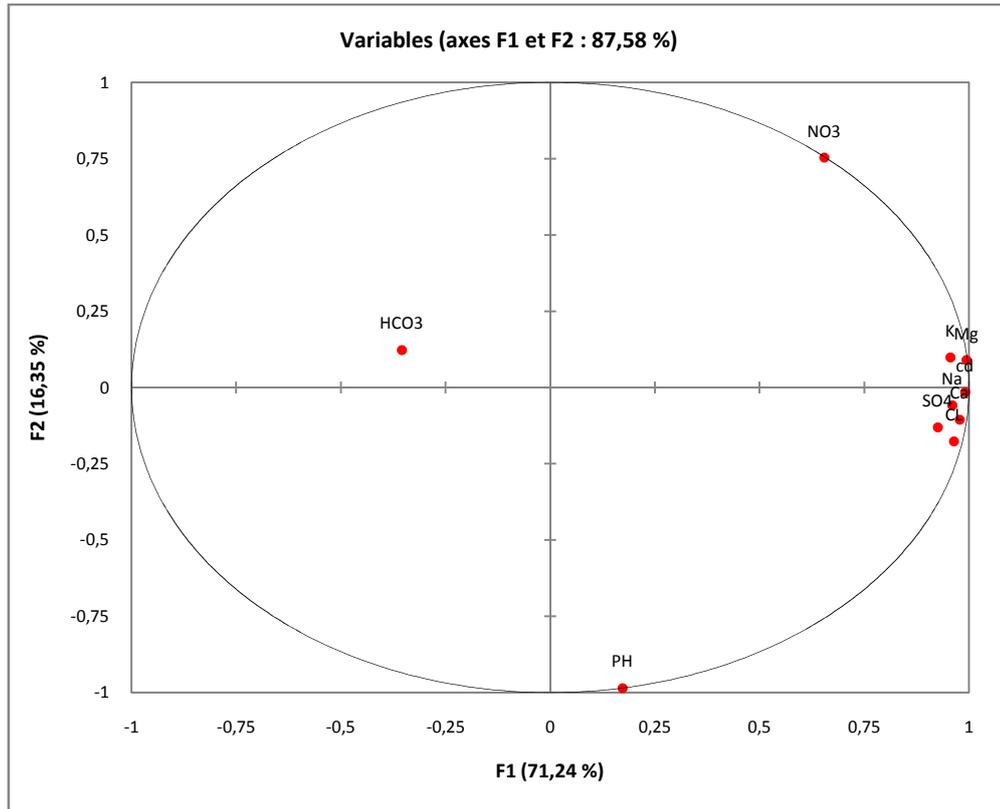


Figure 46 Projection des variables sur le premier plan factoriel.

Le F1 qui exprime 71,24 % des informations et oppose les eaux fortement minéralisées riche en Cl^- , SO_4^{-2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+2} et K^+ aux eaux faiblement minéralisées riche en HCO_3^- . Le F2 qui exprime 16,35 % des informations et oppose les eaux sulfatées calciques chlorurés et magnésiennes sodiques avec présence des nitrates (Figure 46).

5.7. Conclusion

Les résultats obtenus lors de ce travail confirment que le SIG est un moyen efficace et prometteur pour analyser et identifier les problèmes de pollution des eaux souterraines. La carte de l'indice de vulnérabilité a montré que les eaux de foggara de Bouda, Ouled Ahmed et Adrar sont situés dans la classe ou la vulnérabilité est forte par contre les foggaras de Tamentit sont localisé dans la classe vulnérabilité incertaine.

L'analyse des résultats obtenus dans la partie hydrochimie a montré clairement que les paramètres de residu sec (3143 mg/l) , la conductivité électrique (5,07 mS/cm), le sulfate (1530 mg/l) et le nitrate (70 mg/l) sont très élevées pour les eaux de foggara de la région de bouda

le diagramme de Piper nous permet de caractériser les différentes familles des faciès chimiques. On peut déduire de ces résultats que le faciès le plus dominant dans notre région d'étude est chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

L'analyse en composantes principale des eaux de foggara donne des informations que ces eaux sont fortement minéralisées riche en Cl^- , SO_4^{-2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+2} et K^+ .

Conclusion générale

Adrar est située au Sud de l'Algérie et se classe parmi les régions plus arides dont le climat est très sec en été et les précipitations sont pratiquement nulles. L'étude hydrogéologique montre que cette région d'étude fait partie du système aquifère du Sahara septentrional. Composé de deux nappes à savoir le complexe terminal (CT) et le continental intercalaire (CI). Les logs géologiques ont montré que le CI est composé de formations meubles telles que sable, gravier, grès et argile. Les essais de pompages effectués sur les forages et les puits ont permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques de cette nappe CI tels que la transmissivité.

Dans la première partie de cette étude, une description du système d'exploitation du CI a été effectuée en précisant son rôle essentiel dans l'existence et l'alimentation pérenne en eau du système millénaire des foggaras. Un passage en revue de la genèse de ce système et son mode de fonctionnement dans le monde, et notamment dans le Touat, Gourara et Tidikelt, région où est concentrée notre étude. Son utilité dans cette région aride a été précisée en termes d'apport essentiel dans son développement socioéconomique et agricole. Le mode de partage des eaux dans ce système est spécifique. Il utilise un instrument appelé *chekfa* qui est manipulé par une personne chargée d'effectuer les mesures in situ et pour chaque foggara réelle, nommé *kielelma*. La foggara école d'*Oarmoullakbir* à Tamentit a été prise en compte et une comparaison de deux types de *chekfa* ont été mis en œuvre. Le benchmarking dans l'élément essentiel est la *habba* a été étudié. Et cela après avoir procédé expérimentalement à des mesures de jaugeage en débitmètrie à l'aide des deux *chekfas* de Tamentit et de Timimoun. Les résultats ont montré la concordance des mesures, mais à de grands débits les mesures deviennent imprécises et d'autres *chekfas* doivent être mises en œuvre. Néanmoins les résultats obtenus ont montré la conformité entre les valeurs mesurées du débit de *habba* et leurs fractions est vérifiable en termes de quantité. Et ainsi la *chekfa* de Timimoun peut être utilisable pour distribuer les eaux de foggara localisé dans la commune de Tamentit. Donc la transférabilité des *chekfa* inter foggara est possible.

Dans la deuxième partie de cette étude, l'aspect évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines alimentant les foggaras a été analysé. En effet, l'impact anthropique, du au développement socio-économique vertigineux de la région d'étude en terme pression démographique, d'insuffisance d'infrastructures adéquats pour traitement des rejets des effluents (sous différentes formes), conduis à mettre en œuvre une gestion et une stratégie durables pour protéger les ressources en eau souterraines contre toutes sources de pollution.

Ainsi, cette deuxième partie du travail a pour but d'évaluer l'état de pollution des eaux de la foggara en utilisant la méthode DRASTIC afin de montrer les zones les plus vulnérables à la pollution.

Une carte de vulnérabilité à la pollution dans la région d'étude a été établie et relève quatre zones de degré de vulnérabilité variables : une zone de très faible vulnérabilité (3,88 %), elle se localise dans la région de Tamentit. Une deuxième zone de faible vulnérabilité (68,23 %) recouvre la région d'Adrar chef-lieu et une partie de la commune de Tamentit, une zone de moyenne vulnérabilité (27,08 %) se situe dans la région des Bouda, Ouled Ahmed, et une partie d'Adrar chef-lieu, Enfin, la zone de forte vulnérabilité (0,81 %) est localisée en région de Bouda.

La carte de situation de foggara projeté sur la carte des indices de vulnérabilité montrent que les foggaras de Tamentit sont situées dans les zones où la vulnérabilité à la pollution est incertaine. Par contre les foggaras de Bouda, Adrar et Ouled Ahmed sont considérés comme des eaux susceptibles à être polluées. Les analyses physico-chimiques des eaux prélevées des puits de la foggara de Bouda ont montré des concentrations importante en NO_3^- (70 mg/l), SO_4^{-2} (1530 mg/l) et les résidus secs (3143 mg/l).

Références bibliographiques

-
- [1] N. Benouara, A. Laraba, and L. Hachemi Rachedi, "Assessment of groundwater quality in the Seraidi region (north-east of Algeria) using NSF-WQI," *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 16, pp. 1132-1137, 2016.
- [2] H. Smets, "The right to water at the 4th world water forum in Mexico," *Paris: Water Academy*, 2006.
- [3] A. B. Hassane, "Aquiferes superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique: cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger)," These de doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 2010.
- [4] J. Groen, J. Pannek, D. C. Diaz, G. Del Popolo, T. Gross, R. Hamid, G. Karsenty, T. M. Kessler, M. Schneider, and B. Blok, "Summary of European Association of Urology (EAU) guidelines on neuro-urology," *European urology*, vol. 69, pp. 324-333, 2016.
- [5] S. Slimani, "Étalonnage de différents systèmes traditionnels (Chekfa) de mesure de débits en vue d'une restitution du réseau hydraulique de distribution d'une foggara," Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algerie 2011.
- [6] Y. Lekrine, "Hydrodynamisme et minéralisation du complexe aquifère du bassin frontalier d'El Ma El Abiod wilaya de Tébessa (SE Algérien)," Mémoire de magister, Université Mentouri 1 Constantine, Algerie, 2017.
- [7] S.-A. Bellal, M. Hadeid, T. Ghodbani, and O. Dari, "Accès à l'eau souterraine et transformations de l'espace oasien: le cas d'Adrar (Sahara du Sud-ouest algérien)," *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 60, pp. 29-56, 2016.
- [8] T. Idder, A. Idder, A. Tankari Dan-Badjo, A. Benzida, S. Merabet, H. Negais, and A. Serraye, "Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla," *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, vol. 27, pp. 155-164, 2014.
- [9] A. Laaboudi, "Modélisation de l'évapotranspiration de référence pour l'optimisation de l'efficience de l'eau d'irrigation du blé (*Triticum durum* L.)," These de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Alger, Algerie, 2013.
- [10] Y. Boutadara, "Etude hydrogéologique des systèmes de captage traditionnels dans les Oasis Sahariennes «cas des Foggaras de la région du Touat (Adrar)»: cadre géomorphologique," Mémoire de Magister en Hydraulique, Université des Sciences et de la Technologies d'Oran, Algerie, 2009.
- [11] A. Boufekane, "Hydrologie et hydrogéologie de la région de Jijel Etude de la pollution des nappes et méthodologie de protection des ressources", These de doctorat,

-
- Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie, 2017.
- [12] J. Dubief, "*Le climat du Sahara*", *Annales de géographie* vol. 1: Université d'Alger, Institut de recherches sahariennes, 1959.
- [13] M. Bonnet, "*Calcul automatique des bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et Turc*": Bureau de Recherche Géologiques et Minières, Paris, France, 1970.
- [14] S. Trajkovic, M. Gocic, R. Pongracz, and J. Bartholy, "Adjustment of Thornthwaite equation for estimating evapotranspiration in Vojvodina," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 138, pp. 1231-1240, 2019.
- [15] E. d. Martonne, "L'indice d'aridité," *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 3, pp. 3-5, 1926.
- [16] R. Capot-Rey, "Une carte de l'indice d'aridité au Sahara français," *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 28, pp. 73-76, 1951.
- [17] M. Madi, "Modélisation du système aquifère et périmètre de protection du captage d'eau potable dans le Sahara septentrional.(Cas de la région d'In Salah)." These de doctorat, Université de Ouargla, Algérie, 2017.
- [18] J. OSS, "Système Aquifère du Sahara Septentrional," *Hydrogéologie*, vol. 2, 2003.
- [19] M. Benhamza, "aperçu hydrogéologique et hydrochimique sur le système de captage traditionnel des eaux souterraines «foggara» dans la région d'Adrar," Mémoire de magister, Université de Annaba-Badji Mokhtar, Algérie, 2013.
- [20] B. M. Salah, "Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de la salinité sur la qualité de ses eaux." These de doctorat, université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2017.
- [21] L.-A. Besbes-M, "Babasy-M, et Merzougui-B.:", Modélisation du Système Aquifère du Bassin Occidental du Sahara Septentrional, Première Phase: Hydrogéologie et Modèle Conceptuel," *Rapport final d'OSS. Tunis. 64p*, 2005.
- [22] H. Askri, A. Belmecheri, B. Benrabah, A. Boudjema, K. Boumendjel, M. Daoudi, M. Drid, T. Ghalem, A. Docca, and H. Ghandriche, "Geology of Algeria," in *Well Evaluation Conference Algeria*, pp. 1-93, 1995.
- [23] Y. Boutadara, "l'eau dans les oasis d'adrar: desorganisation du système hydraulique millénaire (la foggara)," These de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2021.

-
- [24] G.-R. Kuros, *Irans Kampf um wasser*: Livre, Springer, Berlin, Allemagne 1943.
- [25] A. Bivar, "Irrigation et Drainage dans l'Antiquité, Qanāts et Canalisations Souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce, Seminaire Tenu au Collège de France sous la Direction de Pierre Briant.(Persika 2). pp. 190. Paris, Collège de France Editions, 2001," *Journal of the Royal Asiatic Society*, vol. 12, pp. 380-381, 2002.
- [26] R. Boucharlat, "Iron Age water-draining galleries and the Iranian 'Qanat'," *Archaeology of the United Arab Emirates*, pp. 159-172, 2003.
- [27] S. Guédon, *La frontière romaine de l'Africa sous le Haut-Empire*: Livre, Casa de Velázquez, Madrid, Espagne, 2018.
- [28] P. Kayser and G. Waringo, "L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer: un monument antique de l'art de l'ingénieur au Luxembourg," *Revue archéologique de l'Est*, vol. 52, pp. 429-444, 2003.
- [29] M. Jomehpour, "Qanat irrigation systems as important and ingenious agricultural heritage: case study of the qanats of Kashan, Iran," *International Journal of Environmental Studies*, vol. 66, pp. 297-315, 2009.
- [30] J. Mahmoud, "Indigenous knowledge of Qanat and its cultural aspect," *Social Science Magazine*, vol. 33, 2007.
- [31] R. Boucharlat, "Les galeries de captage dans la péninsule d'Oman au premier millénaire avant J.-C.," *Irrigation et drainage dans l'Antiquité, qanats et canalisation souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce, Persika*, vol. 2, pp. 157-183, 2001.
- [32] D. Stronach and A. Mousavi, *Ancient Iran from the Air*: Livre, Philipp Von Zabern Verlag GmbH, Allemagne, 2012.
- [33] P. Martínez-Santos and P. Martínez-Alfaro, "A brief historical account of Madrid's qanats," *Groundwater*, vol. 50, pp. 645-653, 2012.
- [34] A. K. Biswas, *History of hydrology*: Livre, Elsevier Science Limited, 1970.
- [35] P. Martinez alfaro, "Historia del abastecimiento de aguas en Madrid. El papel de las aguas subterranas," *Anales del Instituto de estudios madrilenos Madrid*, pp. 29-52, 1977.
- [36] R. Ricard, "Jaime O, livre Asín, Historia del nombre «Madrid»," *Bulletin hispanique*, vol. 61, pp. 441-445, 1959.
- [37] D. Deming, "The aqueducts and water supply of Ancient Rome," *Groundwater*, vol. 58, pp. 152-161, 2020.
- [38] P. Bruun, *Stability of tidal inlets*: Livre electronique, *United States Engineer Office Mobile United State,s Elsevier*, 2013.

-
- [39] W. Ritter, "Did Arabian oases run dry?," *Stuttgarter geographische Studien Stuttgart*, pp. 73-92, 1980.
- [40] A. M. Al-Bassam and F. K. Zaidi, "13 Aqueducts in Saudi Arabia," *Underground Aqueducts Handbook*, p. 211, 2016.
- [41] M. Wuttmann, T. Gonon, and C. Thiers, "The Qanats of Ayn Manawir (Kharga Oasis, Egypt)," Conference de presse, Institut français d'archéologie orientale du Caire, Egypte, 2000.
- [42] https://omantourism.gov.om/wps/portal/mot/tourism/oman/home/experiences/culture/aflaj/!ut/p/a0/04_sj9cpykssy0xplmmnz0vmafgjzoitvc1dg40mzazca4ocdydq4jnnp3cjm38zpsd04r0c7idfqhydqn/
- [43] J. Charbonnier, "La maîtrise du temps d'irrigation au sein des oasis alimentées par des aflâj. Étude de cas à Adam (Sultanat d'Oman)," *Revue d'ethnoécologie*, 2013.
- [44] H. Motiee, E. Mcbean, A. Semsar, B. Gharabaghi, and V. Ghomashchi, "Assessment of the contributions of traditional qanats in sustainable water resources management," *International Journal of Water Resources Development*, vol. 22, pp. 575-588, 2006.
- [45] S. Sutton, "The falaj—a traditional co-operative system of water management," *Waterlines*, vol. 2, pp. 8-12, 1984.
- [46] É. Trombert, "The Karez Concept in Ancient Chinese Sources Myth or Reality?," *T'oung Pao*, vol. 94, pp. 115-150, 2008.
- [47] B. Mächtle, S. Hecht, N. Manke, B. Kromer, S. Lindauer, C.-S. Li, Y. Li, X. Wang, and O. Bubenzer, "The age and origin of Karez systems of Silk Road oases around Turpan, Xinjiang, PR of China," in *Socio-Environmental Dynamics along the Historical Silk Road*, ed: Springer, Cham, pp. 359-378, 2019.
- [48] E. Huntington, "The Depression of Turfan, in Central Asia," *The Geographical Journal*, vol. 30, pp. 254-273, 1907.
- [49] Q. Qingwei Shin, "Karez in Turpan Region of China," *What Makes Traditional Technologies Rich? A Review of Traditional Approaches for Water Management in Drylands*, pp. 57-64, 2008.
- [50] L. Kabiri, L. Boudad, A. Krimou, A. Khardi, and L. Elmrani, "Étude préliminaire de la dynamique des dunes continentales dans le Sud-Est marocain (Tafilalt, Maroc)," *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 14, pp. 149-156, 2003.
- [51] I. Kobori and K. Assa'd, *Case studies of foggara oases in the Algerian Sahara and Syria*: Livre, Kobori, Tokyo, Japon, 1982.
- [52] M. Gast, "Foggara.(plur. feggagir)," *Encyclopédie berbère*, pp. 2868-2880, 1998.

-
- [53] S. Idda, "Aménagement de l'espace oasien à foggara face aux changements des conditions hydrogéologiques et socio-économiques.-Cas des oasis de Touat, Gourara et Tidikelt (Sahara algérien)," These de doctorat, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Algerie, 2019.
- [54] J. Vallet, "Une oasis à foggara, Tamentit," *Oasis du Sahara algérien, Institut géographique national, Paris, France, 1973.*
- [55] A. Saidi, "Les systèmes de captage traditionnels dans les oasis sahariennes," *INRH, Alger, ronéo, 1983.*
- [56] F. Mekhalif, "Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement," Mémoire de magister en chimie, Université de Skikda, Algerie, 2009.
- [57] N. Mekaoussi, "comportement des elements chimiques dans les eaux de surface de hammam debagh (est algerien)," Mémoire de magister, Université de Batna 2, Algerie, 2014.
- [58] A. Lounnas, "Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi kroma de Skikda," *Mémoire de Magister Option: pollution chimique et environnementale à la Faculté des sciences, Algerie, 1955.*
- [59] R. A. Q. Qaradaghy, "Vulnerability and risk intensity maps of groundwater Aquifers in Sulaymaniah sub-basin, Iraqi Kurdistan Region," *Unpublished M. Sc. thesis, School of Science, University of Sulaimani, 136pp, 2015.*
- [60] J. Vrba and A. Zaporozec, *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, Livre, Heise, 1994.
- [61] G. Piscopo, "Groundwater vulnerability map, explanatory notes," Livre *Parramatta: NSW Department of Land and Water Conservation, Australie 2001.*
- [62] U. S. Abdullahi, "Evaluation of models for assessing groundwater vulnerability to pollution in Nigeria," *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, pp. 138-142, 2009.
- [63] K. Voudouris, N. Kazakis, M. Polemio, and K. Kareklas, "Assessment of intrinsic vulnerability using DRASTIC model and GIS in Kiti aquifer, Cyprus," *European water*, 2010.
- [64] N. Goldscheider, *Hydrogeology and vulnerability of karst systems: examples from the Northern Alps and the Swabian Alb*, these de doctorat, University of Karlsruhe, Allemagne, 2002.

-
- [65] C. Neukum, H. Hötzl, and T. Himmelsbach, "Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modelling," *Hydrogeology Journal*, vol. 16, pp. 641-658, 2008.
- [66] I. S. Babiker, M. A. Mohamed, T. Hiyama, and K. Kato, "A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan," *Science of the total environment*, vol. 345, pp. 127-140, 2005.
- [67] N. Brooks, "Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework," *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, vol. 38, pp. 1-16, 2003.
- [68] A. J. Witkowski, A. Kowalczyk, and J. Vrba, *Groundwater vulnerability assessment and mapping: IAH-selected papers* vol. 11: CRC Press, 2007.
- [69] J. E. Liggett and S. Talwar, "Groundwater vulnerability assessments and integrated water resource management," *Watershed Manag Bull*, vol. 13, pp. 18-29, 2009.
- [70] S. Foster and P. Chilton, "Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, vol. 358, pp. 1957-1972, 2003.
- [71] D. Ducci and M. Sellerino, "Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers," *Science of the total environment*, vol. 447, pp. 315-322, 2013.
- [72] A. Antonakos and N. Lambrakis, "Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece," *Journal of Hydrology*, vol. 333, pp. 288-304, 2007.
- [73] B. Abdelmadjid and S. Omar, "Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria)," *African Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 7, pp. 949-960, 2013.
- [74] D. V. Stempvoort, L. Ewert, and L. Wassenaar, "Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping," *Canadian Water Resources Journal*, vol. 18, pp. 25-37, 1993.
- [75] J. Margat, "Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]," *Bases de al cartographie, (Doc.)*, vol. 68, 1968.
- [76] H. Vierhuff, "Classification of groundwater resources for regional planning with regard to their vulnerability to pollution," in *Studies in Environmental Science*. vol. 17, ed: Elsevier, pp. 1101-1105, 1981.

-
- [77] A. M. Lemon and N. L. Jones, "Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections," *Computers & Geosciences*, vol. 29, pp. 547-555, 2003.
- [78] G. Gallerini and M. De Donatis, "3D modeling using geognostic data: The case of the low valley of Foglia river (Italy)," *Computers & Geosciences*, vol. 35, pp. 146-164, 2009.
- [79] P. Wycisk, T. Hubert, T. Steinmetz, and W. Gossel, "3D modelling of complex geological structures and its relevance for numerical groundwater models—a case study—REPOS SAFE," in *International Congress: "Radioactive Waste Disposal in Geological Formations"*, Braunschweig, Proceedings, pp. 285-295, 2007.
- [80] V. Murat, D. Paradis, M. Savard, M. Nastev, E. Bourque, A. Hamel, R. Lefebvre, and R. Martel, "*Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec: évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD*: Ressources naturelles Canada", Commission géologique du Canada, Livre, Canada, 2003.
- [81] B. Attoui, "Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région de annaba el-taref et identification des sites d'enfouissement de déchets," mémoire de magister, université de Badji mokhtar Annaba, Algérie, 2009.
- [82] G. M. Ewodo, "Apport des méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans les aquifères du bassin versant de l'Abiergué (région de Yaoundé)," *Sciences de la vie, de la terre et agronomie*, vol. 4, 2017.
- [83] D. Brou, K. K. Lazare, K. K. Innocent, K. K. Seraphin, S. Moussa, K.-w. A. Brice, and G. Dago, "Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS: Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 2, pp. 464-476, 2013.
- [84] M. N. Jahromi, Z. Gomeh, G. Busico, R. Barzegar, N. N. Samany, M. T. Aalami, D. Tedesco, M. Mastrocicco, and N. Kazakis, "Developing a SINTACS-based method to map groundwater multi-pollutant vulnerability using evolutionary algorithms," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 7854-7869, 2021.
- [85] R. C. Gogu, V. Hallet, and A. Dassargues, "Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium)," *Environmental Geology*, vol. 44, pp. 881-892, 2003.
- [86] I. Hamdan, A. Margane, T. Ptak, B. Wiegand, and M. Sauter, "Groundwater vulnerability assessment for the karst aquifer of Tanour and Rasoun springs catchment

-
- area (NW-Jordan) using COP and EPIK intrinsic methods," *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, pp. 1-13, 2016.
- [87] B. Hölting, T. Haertlé, K.-H. Hohberger, K. H. Nachtigall, E. Villinger, W. Weinzierl, and J.-P. Wrobel, *Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung* vol. 63: Schweizerbart, 1995.
- [88] N. Goldscheider, M. Klute, S. Sturm, and H. Hötzl, "The PI method—a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers," *Z Angew Geol*, vol. 46, pp. 157-166, 2000.
- [89] B. Andreo, J. Durán, J. Vías, J. López-Geta, F. Carrasco, and P. Jiménez, "Métodos para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. Aplicación en acuíferos de la Cordillera Bética (Sur de España)," *Investigación en sistemas kársticos españoles*, vol. 12, pp. 185-213, 2004.
- [90] J. Vías, B. Andreo, M. Perles, F. Carrasco, I. Vadillo, and P. Jiménez, "Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method," *Hydrogeology Journal*, vol. 14, pp. 912-925, 2006.
- [91] J. Vias, B. Andreo, M. Perles, F. Carrasco, I. Vadillo, and P. Jiménez, "Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers," in *Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment*, pp. 20-23, 2002
- [92] D. Daly, A. Dassargues, D. Drew, S. Dunne, N. Goldscheider, S. Neale, I. Popescu, and F. Zwahlen, "Main concepts of the " European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping," *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp. 340-345, 2002.
- [93] L. Aller, *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*: Livre, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research, United state, 1985.
- [94] G. Piscopo, "Groundwater vulnerability map explanatory notes-MacIntyre Catchment," Livre, Centre for Natural Resources NSW Department of Land and water Conservation, Parramatta, 2001.
- [95] M. Boughriba, A.-e. Barkaoui, Y. Zarhloule, Z. Lahmer, B. El Houadi, and M. Verdoya, "Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 3, pp. 207-220, 2010.

-
- [96] D. F. Hamamin, "Hydrogeological assessment and groundwater vulnerability map of Basara Basin, Sulaimani Governorate, Iraq, Kurdistan Region," *Unpublished PhD thesis, College of Science, University of Sulaimani*, p. 174, 2011.
- [97] M. M. Awawdeh and R. A. Jaradat, "Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 3, pp. 273-282, 2010.
- [98] M. Hamza, A. Added, R. Rodriguez, S. Abdeljaoued, and A. B. Mammou, "A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf aquifer, Northern Tunisia)," *Journal of Environmental Management*, vol. 84, pp. 12-19, 2007.
- [99] F. Kadkhodaie, A. A. Moghaddam, R. Barzegar, M. Gharekhani, and A. Kadkhodaie, "Optimizing the DRASTIC vulnerability approach to overcome the subjectivity: a case study from Shabestar plain, Iran," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 12, p. 527, 2019.
- [100] I. A. R. Al-Mallah and W. S. Al-Qurnawi, "Intrinsic vulnerability assessment for the Quaternary aquifer in Baghdad area using DRASTIC model," *Applied water science*, vol. 8, p. 139, 2018.
- [101] M.-C. Tu and P. Smith, "Modeling pollutant buildup and washoff parameters for SWMM based on land use in a semiarid urban watershed," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 229, p. 121, 2018.
- [102] C. Travaglia and N. Dainelli, "Groundwater search by remote sensing: A methodological approach", vol 13, Rome, IT: FAO, 2003.
- [103] M. V. Civita, M. D. Maio, and A. Fiorucci, "The groundwater resources of the morainic amphitheatre: A case study in piedmont," *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 5, p. 578, 2009.
- [104] K. Soumia, "Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe du Hodna par la méthode Drastic (cas de région Magra)," mémoire master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2017.
- [105] J. Klug, "Modeling the risk of groundwater contamination using DRASTIC and geographic information systems in Houston County, Minnesota," *Papers in Resource Analysis; Saint Mary's University of Minnesota: Winona, MN, USA*, vol. 11, p. 12, 2009.

-
- [106] R. Li and J. W. Merchant, "Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: A case study in North Dakota, USA," *Science of the total environment*, vol. 447, pp. 32-45, 2013.
- [107] M. Djaafri, "Etablissement d'une carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par la méthode DRSTIC: Cas de la région d'Adrar (Touat)," Mémoire de magister, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella, Algerie, 2006.
- [108] J. Bear, *Hydraulics of groundwater*: livre. Dover edition, Courier Corporation, New York, 2012.
- [109] J. Klug, "Modeling the risk of groundwater contamination using DRASTIC and geographic information systems in Houston County, Minnesota," *Papers in Resource Analysis*, vol. 11, pp. 47-62, 2009.
- [110] D. R. Pathak and A. Hiratsuka, "An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making," *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 5, pp. 63-77, 2011.
- [111] S. Latifi and S. Chaab, "Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien," *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, vol. 34, pp. 48-62, 2017.
- [112] J. Rodier, "L'analyse de l'eau," livre, Dunod, Paris, 2009.

Annexes

(Annexe 01)

Logs des forages

N°BIRH : N003-00006
Désignation : P02 Site n°1
Localisation : X : 00° 23'28" W
Y : 27°57'24" N
Z :
Profondeur : 65 m
Ns : 9,41 m
Debit :



Profondeur	Coupe lithologique	Description géologique	Cotés en (m)	Etage	Coupe technique
0	[Yellow dotted pattern]	Grès jaune	3		
5		Sable fin à moyen jaune			
10	[Yellow dotted pattern]		24		
15					
20					
25					
30	[Red diagonal pattern]	Argile sableuse rouge	50		
35					
40					
45					
50					
55	[White]		65		
60					
65					
70					

Usage :	Daira : Adrar
Date de travaux : 2007	Commune : Bouda
Date fin :	Lieu-dite :
Etat :	

(Annexe 01)

N°BIRH : N004-03263

Désignation : ODZ-111

Profondeur : 180 m

Localisation : X : 0°16'59.49"E

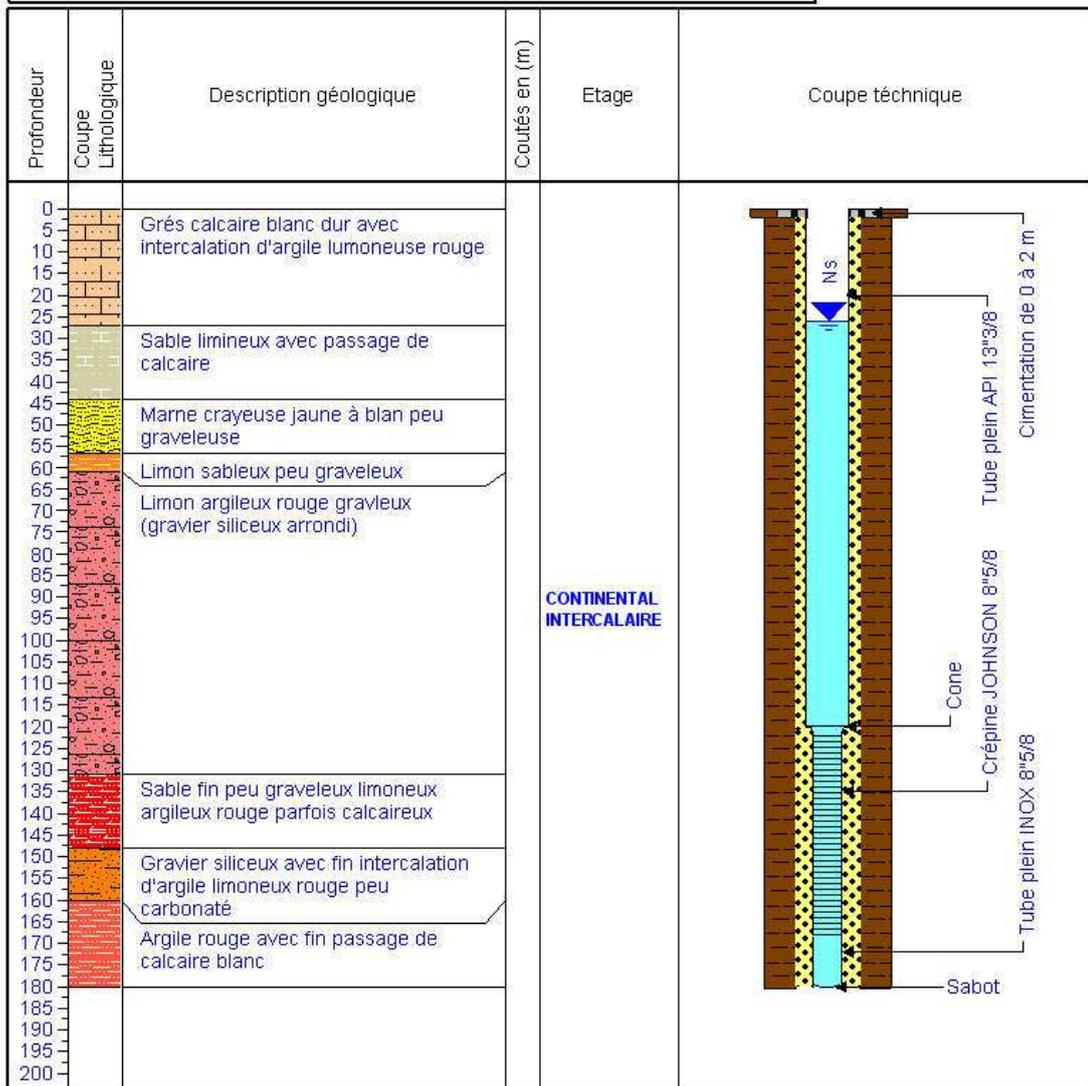
Ns : 26 m

Y : 28°7'20.27"N

ND : 27.3 m

Z :

Débit : 15 L/S



Usage : Industrie	Daira : Fenoughil
Date de travaux : 17/11/2013	Commune : Tamentit
Date fin : 19/11/2013	Lieu-dite : Oued zine
Etat : Non Exploité	

(Annexe 01)

N°BIRH : N004-00568

Désignation: Tilliane VII

Localisation : X : 0°15'02" w

Y : 27°55'09"

Z : 268 m

Profondeur: 150 m

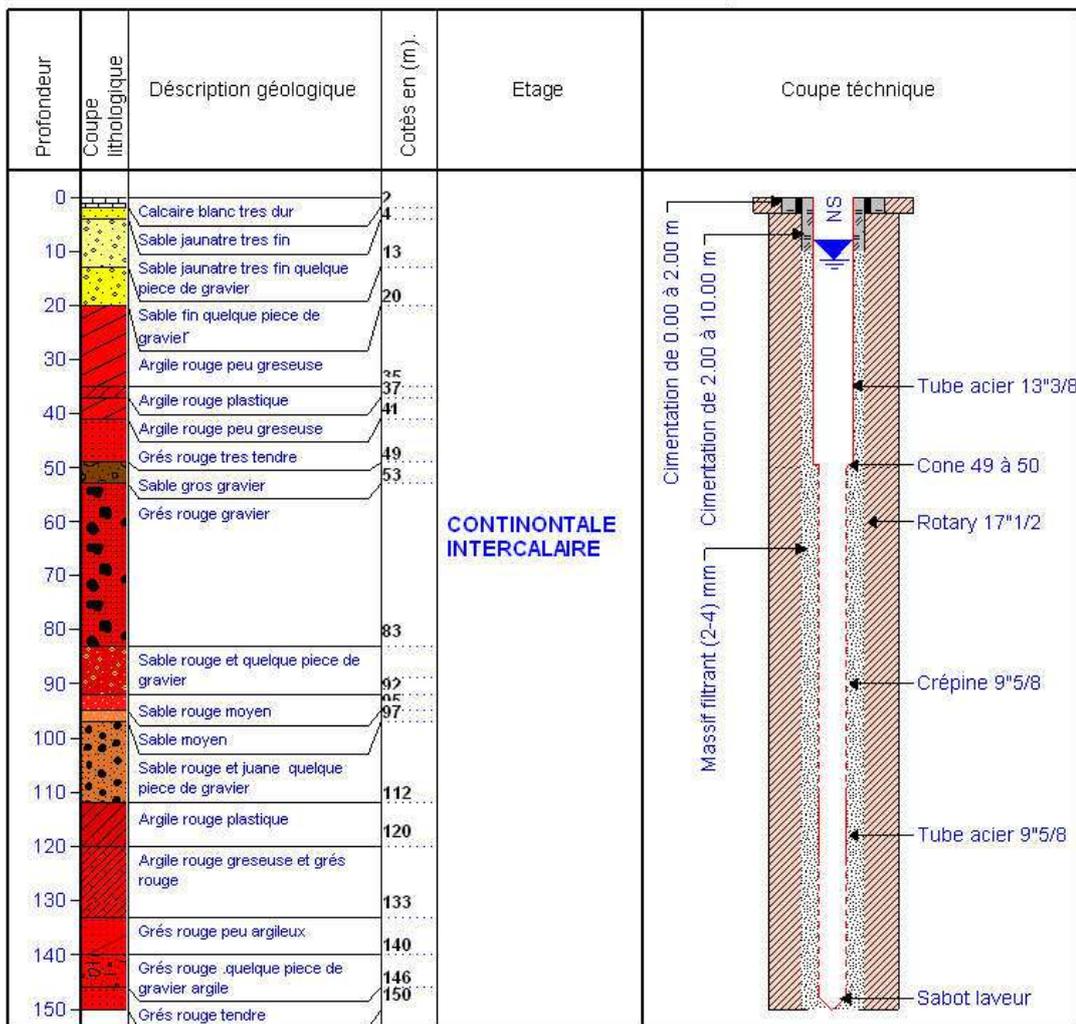
Ns: 11.66 m

Débit : 50 L/S

ND: 33.23 m



AGENCE NATIONALE DES RESSOURCE
HYDRAULIQUE
DIRECTION REGIONALE SUD-OUEST ADRAR



Usage : AEP

Date de travaux : 14/11/02

Date fin : 14/04/03

Etat : Non exploité

Daira : Adrar

Coumune : Adrar

Lieu-dite : Tilliane

(Annexe 02)

Données des forages et puits utilisés

Commune	Lieu dit	Niveau S	Niveau D	Altitude	T m2/s	S	X	Y
ADRAR	SALMI	11,6	20,65	259	$5,97 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-4}$	-0,14138889	28,0208333
ADRAR	KALOUM hassan (Derdjani)	11,6	21,06	278	$5,31 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-4}$	-0,1111111	28,0222
ADRAR	ZONE INDUSTRIELLE	0	0	260			-0,29277799	27,9297
ADRAR	Mme Akroun	11,1	17,84	275	$6,83 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	-0,1225	28,0231
ADRAR	TILILANE	12	52,2	265	$8,04 \times 10^{-5}$	$1,26 \times 10^{-4}$	-0,233889	27,9233
ADRAR	TILILANE	11,66	33,23	268	$2,05 \times 10^{-4}$	$1,24 \times 10^{-4}$	-0,25055599	27,9192
ADRAR	BARBAA	7	47,4	265	$1,65 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-4}$	-0,313889	27,8728
ADRAR	TILILANE	12,5	20,55	265	$6,52 \times 10^{-4}$	$1,05 \times 10^{-4}$	-0,236944	27,8997
ADRAR	BARBAA	5,54	44,49	265	$4,84 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-4}$	-0,313889	27,8728
ADRAR	ROUTE AERODROME	10,50	16,14	260	$8,38 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	-0,211944	27,8494
ADRAR	ZONE INDUSTRIELLE	7,8	20	253	$3,37 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$	-0,29472199	27,8953
ADRAR	ADRAR	11,29	26,79	267	$1,36 \times 10^{-3}$	$2,85 \times 10^{-8}$	-0,28888899	27,8722
ADRAR	TILILANE	13	19,8	276	$6,18 \times 10^{-3}$	$9,10 \times 10^{-2}$	-0,196389	27,8531
ADRAR	TILILANE	11,53	18,96	274	$1,68 \times 10^{-2}$	$3,14 \times 10^{-11}$	-0,20527799	27,8575
ADRAR	CAAS 01-base 1	18,4	31,02	287	$2,99 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$	-0,1225	27,8664
ADRAR	CAAS 09-S1.3	10,85	23,75	279	$3,45 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-4}$	-0,15916701	27,8661
ADRAR	CAAS 10-S1.2	11,4	50,5	279	$8,62 \times 10^{-5}$	$1,21 \times 10^{-4}$	-0,150278	27,8664
BOUDA	BOUDA leghmara	6	14,74	279	$1,33 \times 10^{-3}$	$5,24 \times 10^{-4}$	-0,45277801	28,0314
BOUDA	SIDI MOUSSA	5,63	30,4	240	$6,39 \times 10^{-4}$	$3,95 \times 10^{-5}$	-0,40138889	27,9256
BOUDA	EL MANSOUR	8,15	35,8	236	$2,39 \times 10^{-3}$	$2,46 \times 10^{-5}$	-0,40472201	27,9572
BOUDA	BEN DRAOU	10,8	22,6	241	$2,23 \times 10^{-3}$	$1,51 \times 10^{-3}$	-0,402778	28,0086
BOUDA	O/BEN SEDIK	5,41	11,16	262	$6,27 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	-0,22027799	28,1128
BOUDA	LAAMECHE 2	5,25	23,16	259	$1,73 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-4}$	-0,24805599	28,0847
BOUDA	BAKHADA 02 (Agoudjil)	5,3	11,75	259	$1,16 \times 10^{-2}$	$1,43 \times 10^{-4}$	-0,21250001	28,1336
BOUDA	Guelli 2	5,7	12,36	268	$1,01 \times 10^{-2}$	$4,06 \times 10^{-4}$	-0,32805556	27,9831
Ouled Ahmed TIMMI	EL HABIB	5	15,06	258	$5,42 \times 10^{-3}$	$1,22 \times 10^{-3}$	-0,31638899	27,9553
Ouled Ahmed TIMMI	ZAQUIET SIDI ELBEKRI	10	40,89	252	$2,26 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-4}$	-0,239167	27,8036
Ouled Ahmed TIMMI	INRA	9	34,95	240	$1,18 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$	-0,312222	27,8447
Ouled Ahmed TIMMI	MELOUKA	5,4	58,86	239	$1,47 \times 10^{-5}$	$1,31 \times 10^{-4}$	-0,341111	27,8789
Ouled Ahmed TIMMI	SIDI OUMER	5,7	51,98	243	$6,39 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-4}$	-0,30944401	27,8347
Ouled	KOUSSANE	4,75	47,35	233	$3,36 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-4}$	-0,336667	27,8444

Ahmed TIMMI								
Ouled Ahmed TIMMI	OULED AHMED	8,54	33,56	251	$2,02 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-4}$	-0,27583301	27,8536
TAMENTIT	MONGAR BOUHADID	0	0	301	$5,11 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-4}$	0,21805599	28,1931
TAMENTIT	OUED GHEZALA	17,13	0	298	$6,04 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	0,139167	28,0769
TAMENTIT	OUED GHEZALA	22,76	0	298	$4,43 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	-0,007222	27,9708
TAMENTIT	OUED ZINE	26	27,3	0	$5,55 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	0,28319167	28,1222972
TAMENTIT	OUED ZINE	25,5	32	0	$4,45 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-4}$	0,28250278	28,125
TAMENTIT	OULED EL HADJ MAMOUN	3,5	23,51	252	$1,98 \times 10^{-5}$	$1,26 \times 10^{-4}$	-0,230556	27,7472
TAMENTIT	TAMENTIT	9,6	44,78	240	$9,39 \times 10^{-5}$	$1,28 \times 10^{-4}$	-0,26527801	27,7536
TAMENTIT	SIDI BRAHIM	5,03	45,48	264	$1,08 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$	-0,2475	27,6658
TAMENTIT	NOUM ENNAS	12,95	38,12	243	$1,80 \times 10^{-4}$	$1,17 \times 10^{-4}$	-0,20777801	27,6375

Annexe 3

Analyse physicochimique des eaux de foggara

lieu	Nom de foggara	date de prelevement	source	T°	pH	Cd	RS mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	CL mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	HCO ₃ °F	TH °F	TAC °F	NH ₄ mg/l	NO ₂ mg/l	PO ₄ mg/l	MO mg/l	SiO ₂ mg/l
Bouda	Ahmed Seghir (el bour)	03/12/2019	puits	22,1	7,9	5,07	3143	322	183	710	46	804	1530	70	110	97	14	0	0,011	0	3,7	8,7
			segua	21,4	7,8	5,07	3143	322	183	715	46	804	1530	70	110	97	14	0	0,011	0	3,7	8,7
		17/04/2019	puits	25,5	7,6	5,08	3148	322	183	720	46	805	1530	70	110	97	14	0	0,011	0	3,7	8,7
			segua	27,3	7,5	5,08	3148	322	183	720	46	812	1530	70	110	97	14	0	0,011	0	3,7	8,7
Adrar	A'adouï	11/12/2019	puits	23	7,7	3,46	2146	185	125	310	40	640	539	60	79	77	18	0	0,03	0,3	0,6	10,75
			segua	22,8	7,7	3,46	2146	185	125	310	40	643	539	60	79	76	18	0,009	0,52	0,3	0,9	11,6
		24/04/2019	puits	25,4	7,8	3,47	2150	185	125	305	39	640	539	59	80	80	15	0,009	0,52	0,26	1	11
			segua	27,7	8	3,47	2150	185	125	315	39	650	539	59	80	82	15	0,009	0,52	0,26	1	10,87
Timi	Ben Lhassen (ali Ben Lahcen)	17/12/2019	puits	23	7,47	3,18	1974	167	93	315	31	456	620	63	140	77	12	0	0	0	0,5	9,85
			segua	21	7,5	3,18	1974	167	93	317	30	457	522	63	140	79	12	0	0	0	0,4	9,85
		24/04/2019	puits	25,8	7,4	3,19	1979	167	93	318	28	454	516	64	142	80	11	0	0	0	0,4	10,2
			segua	27,2	7,4	3,19	1979	167	93	320	28	460	516	64	142	80	11	0	0	0	0,4	10,2
Tamenti	Armel Kebir (armoule El Kebir)	17/12/2019	puits	23	8,03	2,86	1774	156	70	250	28	489	540	0	122	31	12	0	0,013	0,005	1,55	9,25
			segua	21	7,8	2,86	1774	156	70	260	28	492	250	0	125	31	12	0	0,013	0,005	1,5	9,25
		25/04/2019	puits	25,3	7,7	2,87	1781	156	70	253	28	494	250	0	116	38	10	0	0,013	0,005	0,8	9,25
		25/04/2019	segua	28	7,7	2,87	1781	156	70	250	28	495	250	0	116	38	10	0	0,013	0,005	0,8	9,25