

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Mémoire de Master Académique

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME

**Etude de la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe alluviale
de Tamanrasset.**

Présenté par

Belahcene Nawal

Soutenu publiquement le 22/06/2019

Devant le jury :

Président :	<i>Haouari I M</i>	MAA	Univ. Ouargla
Promoteur :	<i>Hadj-Said S</i>	Pr	Univ. Ouargla
Examineur :	<i>Bouselsal B</i>	MCA	Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier ALLAH le tout puissant, le tout miséricordieux qui, grâce à sa protection et sa bienveillance, il m'est permis d'acquérir le savoir et d'arriver à ce niveau.

En premier lieu, Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de mémoire Madame HADJ SAID, Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé et pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail.

Je remercie l'ensemble des membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger mon travail.

Un grand merci à Mr Derouiche Mouhamed Tahar et Mr Lakhchakhech Rachid pour son soutien tout au long de mon étude universitaire.

Merci de tout mon cœur à mes Parents et mes sœurs pour m'avoir toujours écouté, réconforté et encouragé.

Dédicace

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

À mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Merci d'être toujours là pour moi.

Belahcene Nawal

الملخص

تعد طبقات المياه الجوفية من مصادر المياه الهامة للغاية ولكنها أكثر عرضة للتلوث. هذه الدراسة تحدد درجات حساسية الطبقة المائية للتعرض لجميع أنواع التلوث المحتمل بمنطقة تمنراست. استخدام طريقة لتحديد حساسية المياه الجوفية :- GOD DRASTIC كما تم رسم الخرائط باستخدام برنامج Surfer الذي يسمح في النهاية بالحصول على خريطة ذات فئات مختلفة من الحساسية للتلوث (حساسية عالية أو ضعيفة). أتاحت الخريطة التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة GOD التمييز بين منطقة الحساسية للتلوث والتي تقع في الـ وتحتل جزءاً كبيراً من منطقة الدراسة ، تتميز بعمق ضعيف لطبقة المياه الجوفية وتشكيلات رملية نفاذة عالية الحساسية للتلوث تقع في الشمال الشرقي و تُظهر خريطة DRASTIC أن هناك فئتين: حساسية الضعيفة تحتل الشمال ومنطقة الحساسية الضعيفة تقع في الوسط وتمتد إلى الجنوب من لأخطار المياه الجوفية هي أداة تسمح الإستدامة للموارد الطبيعية ، إدارة مخاطر الموارد المائية ، مراقبة جودة المياه ، وتحديث بيانات الموارد.

كلمات المفتاح: المياه الجوفية ، قابلية التلوث ، المناطق الجافة

RESUMÉ

Les nappes alluviales sont des ressources en eaux très importantes mais elles sont très vulnérables à la pollution.

Cette étude consiste à déterminer les degrés de vulnérabilité intrinsèque à tous les types de pollutions potentielles de la nappe alluviale de la région de Tamanrasset. Deux méthodes ont été utilisées pour la caractérisation de la vulnérabilité de la nappe à la pollution : DRASTIC et GOD. La cartographie de la vulnérabilité a été faite par l'utilisation du logiciel Surfer. Les cartes établies sont mis en évidence différentes classes de vulnérabilité.

La carte obtenue par la méthode GOD a permis de distinguer une zone à moyenne vulnérabilité située au centre et occupe une grande partie de la zone d'étude caractérisée par une faible profondeur de la nappe et par des formations à dominance sableuses perméables. Une classe à vulnérabilité forte observée au Nord à l'Est et au Sud de la zone

La carte relative à la méthode DRASTIC montre qu'il y a deux classes de vulnérabilité, la zone de faible vulnérabilité occupe le Nord et la zone de très faible vulnérabilité située au centre et s'étend au Sud de la zone.

L'étude de la vulnérabilité à la pollution est un outil permettant de contribuer à une gestion plus durable des ressources naturelles, en gérant les risques liés à la ressource en eau, en surveillant sa qualité et en actualisant les données sur la ressource.

Mots-Clés : Nappe alluviale, Vulnérabilité, pollution, zone aride.

ABSTRACT

Alluvial groundwater are very important water resources but they are more vulnerable to pollution.

This study consists in determining the intrinsic degrees of vulnerability to all types of potential pollution of the alluvial groundwater of Tamanrasset Two methods were used to characterize the vulnerability of the alluvial groundwater to pollution: DRASTIC and GOD. Vulnerability mapping was done using the Surfer software. The established maps highlighted different classes of vulnerability.

The map obtained by the GOD method made it possible to distinguish a medium-vulnerability zone located in the center and occupies a large part of the study area characterized by a low aquifer depth and permeable sandy formations. A class with high vulnerability observed at north, east and south of the zone

The DRASTIC map shows that there are two classes of vulnerability, the area of low vulnerability occupies the North and the zone of very low vulnerability located in the center and extends to the South of the zone.

The study of vulnerability to pollution is a tool for contributes to more sustainable management of natural resources, managing water resource risks, monitoring water quality, and updating resource data.

Keywords: alluvial groundwater, Vulnerability, pollution, arid zone.

Liste des abréviations

SIGES : Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines

ANDI : Agence Nationale de Développement de l'Investissement

DRASTIC: Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer.

GOD: Groundwater occurrence, Overall aquifer class and Depth of water

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

P : Précipitations.

T : Température.

H : Humidité

V.v : Vitesse de vent

Ev : Evaporation

O.R.G.M : Office national de recherche géologique

EPA : Environmental Protection Agency

Liste des figures

Figure 1 : Carte de situation géographique de la région d'étude	12
Figure 2 : Image satellitaire de Tamanrasset.....	15
Figure 3 : Carte des principaux domaines structuraux du Hoggar.....	17
Figure 4 : Carte géologique de la région de Tamanrasset (extrait de la carte géologique du massif du Hoggar, ORGM 2004).	18
Figure 5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (1980-2015).....	20
Figure 6 : Variation de Températures moyennes mensuelles	21
Figure 7 : Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1952)	24
Figure 8 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Tamanrasset (J. Dubief, 1953)	29
Figure 9 : Bassin versant zone d'étude.....	31
Figure 10 : Coupe hydrogéologique (Boulahbal.S 2012)	32
Figure 11 : Carte piézométrique de la nappe d'Oued Tamanrasset Mars 2014	33
Figure 12 : Carte piézométrique de la nappe d'Oued Tamanrasset Novembre 2014	34
Figure 13 : Schéma représentant la zone non saturée	37
Figure 14 : Carte de la vulnérabilité relative à la profondeur de la nappe	38
Figure 15 : Schéma représentant la zone saturée	39
Figure 16 : Courbes granulométrique de l'échantillon 1 à 20 et 60cm	41
Figure 17 : Courbes granulométrique de l'échantillon 2 à 30 et 60 cm	42
Figure 18 : Carte de la vulnérabilité relative à la topographie	44
Figure 19 : carte de vulnérabilité DRASTIC	47
Figure 20 : Vulnérabilité de la nappe d'inféro-flux de Tamanrasset par la méthode GOD	48
Figure 21: carte de profondeur GOD	49
Figure 22 : Carte de vulnérabilité GOD	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC.....	7
Tableau 2 : Indice d'épuration des différents matériaux (REHSE, 1977) .. Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 3 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC	9
Tableau 4 : Les poids des paramètres de méthode DRASTIC	9
Tableau 5 : les paramètres de la méthode GOD.....	9
Tableau 6 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode GOD.....	10
Tableau 7: les coordonnées de la station de Tamanrasset.....	19
Tableau 8: Précipitation moyenne mensuelle et annuelle de Tamanrasset (1980-2015)	20
Tableau 9:Températures moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (1980-2015).....	20
Tableau 10 : Humidités moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (Hanni.I) 1980/2015.....	21
Tableau 11 : Vitesses Moyennes mensuelles du vent (en m/s).(Hanni.I)	21
Tableau 12 : Evaporations moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (1975-2002) Boulahbal S. (2012).....	22
Tableau 13 : Résultat des calculs de l'indice d'aridité de Moral	22
Tableau 14 : Indice de De Martonne	23
Tableau 15 : Résultat des calculs de l'indice d'aridité de De Martonne pour Tamanrasset	23
Tableau 16 : bilan hydrique estimée par la méthode de Thornthwaite à Tamanrasset période (1980-2015).....	25
Tableau 17 : Valeurs de l'évapotranspiration potentielle estimée par la méthode de Turc à Tamanrasset période (1980/2015).....	26
Tableau 18 : Données utilisées pour le calcul de la vulnérabilité (M Edilasioet al.,2015).....	36
Tableau 19 : Poids, Note et indice du paramètre de la profondeur de la nappe	37
Tableau 20 : Poids, Note et indice du paramètre de Recharge.....	38
Tableau 21 : Les caractéristiques lithologiques de l'aquifère au niveau de forage F18	39
Tableau 22 : Poids, Note et indice du paramètre de la nature de la zone saturée	40
Tableau 23 : Poids, Note et indice du paramètre de Type de sol	43
Tableau 24 : Poids, Note et indice du paramètre de la Topographie	43
Tableau 25 : Indice d'épuration des différents matériaux (REHSE, 1977)	45
Tableau 26 : Poids, Note et indice du paramètre de la nature de la zone non saturé	45
Tableau 27 : Poids, Note et indice du paramètre de la perméabilité.....	46

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Généralité sur la vulnérabilité	
I. Concept de vulnérabilité des eaux souterrain à la pollution	2
I.1-Définition de la vulnérabilité	2
I.2-Types de vulnérabilité	2
I.3-Définition de pollution	3
I.3.1-La pollution des eaux	3
I.4-Les sources de pollution.....	3
II. Les critères de la vulnérabilité	3
II.1.Les critères de la vulnérabilité intrinsèque	3
II.1.1.Critères relatifs aux Sol	3
II.1.2.Critères relatifs à la zone non saturé	4
II.2- Les critères de la vulnérabilité spécifique	4
III. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines	4
III.1- L'objectif des cartes de vulnérabilité	5
IV. Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères	5
IV. 1. Les méthodes de cartographies à index	5
IV. 2 .Les modèles de simulation.....	6
IV. 3 .Les méthodes statistiques	6
IV. 4 .Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères	6
IV. 4 .1.La méthode DRASTIC	7
IV. 4 .2.La méthode <i>GOD</i>	9
V. La validation des cartes de vulnérabilité	10
VI. Les logiciels utilisés	10
VI.1. logiciel Surfer	10
VI.2. Système d'information géographique « SIG »	11
VI.2.1. L'apport du SIG dans la cartographie de la vulnérabilité et du risque de pollution	11
Chapitre 2: Présentation de la région d'étude	
I. Localisation géographique	12
II. Les activités socio-économiques à Tamanrasset	13
II. 1. Le tourisme	13

II. 2. Les activités agricoles	13
II. 3. Les activités industrielles	14
III. Géomorphologie de la région d'étude.....	14
III.1. Le relief	14
III.1.1. Les Plateaux du Tadmait et du Tinghert	14
III.1.2. Les plaines	14
III.1.3. Les Massifs isolés	15
IV. L'étude géologique	15
IV.1. Présentation du Hoggar	15
IV.1.1. La géologie du Hoggar	15
IV.1.1.1. Domaine du Hoggar occidental	16
IV.1.1.2. Domaine du Hoggar central polycyclique	16
IV.1.1.3. Domaine du Hoggar oriental	16
IV.2. La géologie de la région d'étude	17
V. Les caractéristiques climatiques de la région	19
V .1. Etude des caractéristiques climatiques de la région	20
V .1.1. la précipitation	20
V .1.2. La température	20
V .1.3. Humidité	21
V .1.4. Le vent	21
V .1.5. L'évaporation	21
V .2. Les indices climatiques	22
V .2.1. Le quotient pluviométrique annuel de Moral	22
V .2.2. Indice d'aridité de De Martonne	22
V .2.3. Indice ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN	23
V.3. Evapotranspiration.....	24
V .3.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle et potentielle	24
1. Méthode de Thornthwaite	24
2. Méthode de Turc	25
VI. Conclusion	26
Chapitre 3: Etude hydrogéologique	
I. Introduction.....	28
II. Hydrologie du bassin de l'oued Tamanrasset	28
II.1. Description du bassin de l'oued Tamanrasset	28
II.2.1. La surface	30

II.2.2.Le périmètre	30
II.2.3.Forme du bassin versant	30
II.2.4.Rectangle équivalent	30
II.2.5.Longueur du cours d'eau principal	31
III. Hydrogéologie du bassin de l'oued Tamanrasset	31
III.1.Les aquifères capté dans la région	31
III.2.La piézométrie de la nappe	33
III.2.1.La carte Piézométrique de la campagne de Mars 2014	33
III.2.2.La carte piézométrique de la campagne de Novembre 2014	34
IV. Conclusion	34

Chapitre 4: Etude de la vulnérabilité à la pollution

I. Introduction	36
II. Elaboration des cartes des paramètres spécifiques de la vulnérabilité de la nappe	36
II.1.Carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC	36
II.1.1.Profondeur de la nappe D	36
II.1.2.Recharge R.....	38
II.1.3.Nature de la zone saturée A	38
II.1.4.Type de sol S.....	40
II.1.5.Topographie T.....	43
II.1.6.Nature de la zone non saturée I.....	44
II.1.7.Perméabilité C.....	46
II.1.8.Carte de vulnérabilité	46
II.2.Méthode GOD	48
II.2.1.Carte de profondeur D	48
II.2.2.Carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD	49
III. Conclusion.....	50
Référence bibliographique	

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est la vie, elle est en amont de toute activité économique, dans les zones arides les ressources en eau souterraines sont fortement exploitées pour satisfaire les besoins car c'est la seule ressource en eau. La rareté de la pluviométrie et l'augmentation de la demande en eau dans tous les secteurs ainsi que les problèmes de pollution qui menacent ces ressources, sont à l'origine de sa diminution.

La pollution des eaux souterraines est un problème qui croît jour après jour. La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères est une approche utilisée pour déterminer les zones vulnérables à la pollution afin de protéger ces ressources.

La région de Tamanrasset fait partie des zones arides où la précipitation est rare et limitée, l'alimentation en eau de la région de Tamanrasset est assurée par la nappe alluviale. Cette nappe est fortement sollicitée à cause de sa bonne qualité.

L'objectif de cette étude est l'étude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tamanrasset et de déterminer l'état actuel de la nappe.

Pour atteindre ce but nous avons structuré notre travail en 4 chapitres :

- Le premier chapitre permet d'exposer les principes de base du concept de vulnérabilité, et des méthodes d'estimation de la vulnérabilité répertoriées dans la littérature.
- Le deuxième chapitre consiste à présenter la région d'étude et donner une vue générale sur la géologie et la climatologie de la région.
- Le troisième chapitre concerne l'étude hydrogéologique, une présentation des aquifères existants dans la région et une étude piézométrique, avec une vue générale sur l'hydrologie du bassin versant étudié.
- Le quatrième chapitre est l'étude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe et l'établissement de la carte de vulnérabilité qui permet de délimiter les zones à différents degrés de vulnérabilité à la pollution.

Chapitre 1
Généralité sur la vulnérabilité

I. Concept de vulnérabilité des eaux souterrain à la pollution :

I.1-Définition de la vulnérabilité :

Le terme de la vulnérabilité a été utilisé dans les années 1960 par l'hydrogéologue Français J. Margat et depuis lors il a été utilisé plus largement dans les années 1980 (Haertle.1983; Aller et al. 1987; Foster et Hirata. 1988). Actuellement le terme est communément utilisé partout dans le monde.

La vulnérabilité est définie comme la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée. Véhiculé depuis l'eau des précipitations qui s'infiltrer à la surface du sol, le contaminant percole ainsi à travers la zone non saturée (vadose) jusqu'à atteindre la zone saturée.

La vulnérabilité des nappes correspond à leur sensibilité aux différents facteurs physiques stableau les dans la mesure où elles sont plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Elle étudie les possibilités de propagation du polluant dans le sol (Albinet, 1989).

I.2-Types de vulnérabilité : on distingue deux types de vulnérabilité

- **Vulnérabilité intrinsèque** : est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines.

La vulnérabilité intrinsèque correspond à une notion de vitesse de propagation de la pollution verset dans la nappe d'eau souterraine. Elle caractérise la plus ou moins grande capacité de « défense » d'une nappe vis-à-vis d'une pollution. A la différence de la vulnérabilité spécifique. Elle est indépendante du polluant.

Son évaluation prend en compte des facteurs physiques qui influencent le mouvement d'un polluant jusqu'à la nappe et sont peu susceptibles de varier dans le temps. La couverture végétale n'en intervient donc pas dans l'appréciation de la vulnérabilité intrinsèque.

- **Vulnérabilité spécifique** : est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

La vulnérabilité intrinsèque peut-être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux sources de pollution) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

I.3-Définition de pollution :

La pollution est une dégradation de l'environnement par l'introduction dans l'air, l'eau ou le sol de matières n'étant pas présentes naturellement dans le milieu. Elle entraîne une perturbation de l'écosystème dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement, on distingue 3 types de pollution :

- Pollution de l'eau
- Pollution de l'air
- Pollution de sol

I.3.1-La pollution des eaux :

On appelle pollution de l'eau toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants. Quand les êtres humains consomment de l'eau polluée, il y a en général des conséquences sérieuses pour leur santé. La pollution de l'eau peut aussi rendre l'eau inutilisable pour l'usage désiré.

I.4-Les sources de pollution

- **Naturel :**

Les eaux souterraines contiennent quelques impuretés, même si elles ne sont pas affectées par les activités humaines. Les types et les concentrations d'impuretés naturelles dépendent de la nature du matériel géologique par lequel les eaux souterraines se déplacent et de la qualité de l'eau de recharge.

- **Agricole :**

Les engrais et pesticides et les déchets animaux sont les principales sources agricoles de contamination des eaux souterraines.

- **Industriel :**

Dans le domaine d'industries la demande en eau est élevée pour les procédés de refroidissement, de traitement ou de nettoyage. La pollution des eaux souterraines se produit quand l'eau utilisée est retournée au cycle hydrologique.

II. Les critères de la vulnérabilité :**II.1.Les critères de la vulnérabilité intrinsèque:****II.1.1.Critères relatifs aux Sol :**

- **La recharge:** représente la quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe par le ruissellement et l'infiltration des eaux de surface. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles.

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

II.1.2. Critères relatifs à la zone non saturé :

- **Profondeur de la nappe libre :** Le temps de transfert des polluants est déterminé par l'épaisseur de la zone non saturée, c'est-à-dire que plus l'épaisseur de la zone non saturée n'est grande, plus le temps de transfert de polluant n'est long.
- **Amplitude de battement de nappe:** Elle peut devenir un critère de vulnérabilité dans la mesure où elle est significative (l'amplitude de battement de la nappe, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe).
- **Perméabilité verticale de la zone non saturée:** Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.
- **Structure de la zone non saturée :** variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en M.O. (matières organiques) et argile sont autant de facteurs conditionnant la migration de fluides vers la nappe.

II.2- Les critères de la vulnérabilité spécifique :

- **Capacités dispersives et épuratoires des sols :** Concerne les propriétés auto épuratoires des sols.
- **Qualité du réseau hydrographique :** Le réseau hydrographique peut être vecteur de contaminations vers les eaux souterraines.
- **La topographie :** L'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels (forêt, cultures, élevage, habitat, tissu industriel, etc....).

III. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines :

Les premiers concepts et la méthodologie des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines ont été développés en Europe dans le milieu des années 1960 (Zaporozec & Vrba. 1994b).

Les cartes de vulnérabilité ont été conçues et élaborées comme des outils destinés à sensibiliser l'opinion publique et les décideurs politiques à la gravité des problèmes posés par la pollution de certains réservoirs aquifères. Il s'agissait de montrer que la protection naturelle des nappes est variable suivant la localisation et d'identifier les aires pour lesquelles des mesures de protection devaient être envisagées.

Ces cartes régionales opposaient les zones considérées comme les plus vulnérables à d'autres moins vulnérables. Par une gamme de couleurs limitée représentant chacune une classe de vulnérabilité à des pollutions éventuelles de nature variée.

L'utilisation de cartes de vulnérabilité répandues dans les pays européens (France, Tchécoslovaquie et Allemagne) ainsi qu'en Amérique à la fin des années 1960 et au début des années 1970.

III.1- L'objectif des cartes de vulnérabilité :

Les documents cartographiques produits depuis près de trois décennies montrent que les objectifs des cartes de vulnérabilité peuvent être généraux ou au contraire beaucoup plus précis et que l'expression cartographique de ces objectifs s'exprime sous des échelles différentes (Landreau. 1996). Il peut s'agir:

« D'une sensibilisation ou d'une "éducation" à la protection des ressources en eau souterraine »

Les documents cartographiques correspondant sont généralement à petite échelle et la communication est privilégiée par rapport au contenu technique de la carte.

« D'une orientation de politique générale pour la gestion de la qualité des ressources ou pour la police des eaux. » s'agissant d'apporter des éléments d'orientation. Le contenu de la carte peut être plus riche que pour l'objectif précédent mais avec une échelle de représentation du même ordre.

« D'une aide à la décision en matière d'aménagement » par aide à la décision il faut entendre "document permettant d'orienter la décision" lorsqu'on est au stade de l'élaboration de scénarios possibles d'aménagement. Des démarches de planification peuvent être adjointes à l'aide à la décision. Cela peut être, par exemple, le choix de zones à priori favorables ou défavorables à l'implantation de stockage de déchets. Le choix de l'implantation définitive ne se fait bien évidemment pas sur la base de ce document mais suite à des études complémentaires plus détaillées. La carte de vulnérabilité en association le plus souvent avec d'autres documents sert à préciser les secteurs dans lesquels doivent porter des études complémentaires pour implanter l'aménagement prévu au mieux et en toute connaissance de cause.

« D'un outil pour l'aménagement ou pour la protection des ressources en eau et des captages »

Ce document, associé également à d'autres, doit permettre de prendre une décision "définitive". Cela nécessite que le document ait une précision suffisante adaptée aux enjeux des décisions à prendre.

IV. Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères :

IV. 1. Les méthodes de cartographies à index : basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou

une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple) ;

Cette méthode comporte deux types d'approche :

- **Méthode des systèmes hiérarchisés** : Fonctionne en comparant une zone donnée à des critères qui représentent les conditions d'autres régions (autres bassins ou autres systèmes aquifères), l'objectif de l'utilisation de cette méthode est pour l'évaluation de la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale ou nationale).
- **Méthode des systèmes paramétrés** : repose sur la sélection de paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relative à une contamination.

Le system paramétrés est divisé en trois groupes :

Systèmes matriciels " petite échelle d'étude" systèmes indexés " échelle moyenne d'étude", mais non prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité et méthodes de pondération et d'indexation des paramètres" échelle moyenne d'étude et prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité

IV. 2 .Les modèles de simulation : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe.

IV. 3 .Les méthodes statistiques : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

IV. 4 .Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères :

(Point Count Systems Models. PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues2000;Zaporozec et Vrba 1994).

IV. 4 .1.La méthode DRASTIC :

DRASTIC est une méthode américaine de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, elle a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al* en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen et al., 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères reportés sur sept cartes.

C'est grâce à la superposition de ces sept cartes que l'on peut produire les cartes de vulnérabilité.

La méthode DRASTIC est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle (Lyakhloufi et al. 1999). Les sept paramètres de cette méthode sont :

D : profondeur de la nappe

R : Recharge

A : Type de l'aquifère (nature de la zone saturée)

S : Nature de sol

T : Topographie

I : Nature de la zone non saturée

C : La perméabilité de la zone saturée

Chaque critère est cartographié avec un index appelé aussi note (n) allant typiquement de 1 à 10 (La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.). Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante:

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Les cartes DRASTIC permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index

Tableau 1 : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC

D : distance à la nappe (m)		R : recharge (mm)	
Valeurs (m)	Notation	valeurs (mm)	Notation
0 – 1.5	10	0—50	1
1.5 – 4.5	9	50 – 100	3
4.5 – 9	7	100 – 175	6
9 - 15	5	175– 225	8
15 – 22.5	3	>225	9
22.5- 30	2		
> 30	1		

A : Nature de la zone saturée		S : NATURE DU SOL	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats	7
Grès massifs	6	Limon sableux	6
Métamorphique altéré	4	Limon	5
Métamorphique	3	Limon silteux	4
Shale massif	2	Limon argileux	3
		Argiles non agrégée	1
T : Topographie		C : Perméabilité	
Valeurs (%)	Notation	< 9,4 10 ⁻⁴ m/s	10
0 – 2	10	4,7.10 ⁻⁴ – 9,4.10 ⁻⁴ m/s	8
2 – 6	9	4,7.10 ⁻⁴ m/s– 32,9.10 ⁻⁵	6
6 – 8	8	32,9.10 ⁻⁵ m/s –14,7.10 ⁻⁵	4
8 –10	7	14,7.10 ⁻⁵ m/s– 4,7.10 ⁻⁵	2
10–12	5	4,7.10 ⁻⁵ m/s– 4,7. 10 ⁻⁷	1
12 – 18	3		
>18	1		

I : Nature de la zone non saturée	
10	Calcaire karstique
9	Sable et gravier
8	Sable et gravier avec silt et argile
6	Grès
6	Calcaire
1	Silt/Argile

Tableau 2 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (ALLER et al, 1987)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	<80
Faible	80 – 120
Moyen	120 – 160
Elevé	160 – 200
Très Elevé	> 200

Tableau 3 : Les poids des paramètres de méthode DRASTIC

Paramètre	Poids
D	5
R	4
A	3
S	2
T	1
I	5
C	3

IV. 4 .2.La méthode GOD :

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

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

G : Type de nappe (Groundwater occurrence) ;

O : Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overallaquifer class) ;

D : Profondeur de la nappe (Depth to groundwater tableau le).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

Tableau 4 : les paramètres de la méthode GOD

G : type de nappe		O : type d'aquifère	
Type d'aquifère	cote	Sol résiduel	0.4
Aucun aquifère	0	Limon alluvial	0.5
Nappe captive et artésien	0.1	Sable éolien roche ignés et métamo-	0.6
Nappe captive	0.2	rphique fracturée	
Nappe semi captive	0.3	Sable et gravier	0.7
Nappe avec couverture de surface	0.4 - 0.6	Gravier	0.8
Nappe non confiné (libre)	0.7 - 1	Calcaire	0.9
		Calcaire fracturé karstifié	1

D : profondeur de la nappe	
Profondeur	cote
0 – 2	1
2 – 5	0.9
5 – 10	0.8
10 – 20	0.7
20 – 50	0.6
50 – 100	0.5
>100	0.4

Le calcul de l'indice de GOD (IG) selon l'équation suivant :

$$IG = Ca * Cl * Cd$$

Les différentes plages d'IG obtenues ont été mises en parallèle avec les classes de vulnérabilité, les intervalles des valeurs de l'indice de GOD et classes correspondante (Tableau 5)

Tableau 5 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode GOD

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	0–0.1
Faible	0.1 – 0.3
Moyenne	0.3 – 0.5
Elevé	0.5– 0.7
Très Elevé	0.7–1

V. La validation des cartes de vulnérabilité :

La détérioration de la qualité de l'eau souterraine est appréciée par des mesures des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Plusieurs auteurs (Anani, 2006 ; Jourda *et al.*, 2006; Jourda, 2005 ; Kouamé, 2003 ; Mohamed, 2001 ; Champagne et Chapuis, 1993 et Isabel *et al.*, 1990) ont vérifié la validité de la méthode DRASTIC en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines. Dans la validation des cartes de vulnérabilité, les zones réellement contaminées doivent correspondre à celles où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés.

VI. Les logiciels utilisés :

VI.1. logiciel Surfer

Selon Alami, (2011). Le logiciel Surfer conçu par Golden Software, permet de réaliser des cartes à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) en coordonnées Lambert 93. Le logiciel permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points x, y,

et z, afin de les ordonner. Ces grilles peuvent être importées depuis plusieurs sources pour produire différents types de cartes, incluant des contours, des vecteurs, des images ainsi que des cartes superficielles. Surfer contient plusieurs options cartographiques qui permettent de produire une carte représentant le mieux possible les données utilisées. La carte peut être améliorée en affichant les points de données, en combinant plusieurs cartes ou en ajoutant des dessins ou des annotations.

VI.2. Système d'information géographique « SIG » :

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un logiciel informatique de la firme ESRI capable d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées. Le SIG permet d'acquérir, d'organiser, de gérer, de traiter et de restituer des données géographiques sous forme de plans et cartes (cartographie intuitive et évolutive). Il s'agit d'un système de gestion entrepreneurial qui permet à toute organisation (entreprise ou collectivité) de gérer spatialement son activité.

VI.2.1. L'apport du SIG dans la cartographie de la vulnérabilité et du risque de pollution :

L'apport du SIG dans la cartographie de la vulnérabilité et des risques de pollution des eaux souterraines est indéniable. Il offre une multitude d'opérations, en mode vecteur et raster, au sein d'une base de données spatialement référencée de façon à extraire commodément des synthèses utiles à la décision. Parmi les opérations que le SIG a facilité, on cite :

- Les opérations de gestion des données relatives aux différents facteurs (épaisseurs; nature des couches...)
- L'estimation des paramètres utilisés pour calculer l'indice de vulnérabilité (temps de transit, degré d'épuration...);
- L'interpolation de données ponctuelles en couvertures thématiques;
- La superposition des couvertures thématiques afin d'en générer de nouvelles couches d'informations;
- Calcul de l'indice de vulnérabilité par l'application du modèle TCR;
- Classification de l'indice et la cartographie de sa variabilité en degrés de vulnérabilité.

Chapitre 2

Présentation de la région d'étude

I. Localisation géographique :

La région de Tamanrasset est une wilaya située dans le grand sud algérien (Hoggar centrale), à 1900 Km au sud d'Alger, elle s'étend sur une superficie totale de 557 906 Km², avec les coordonnées géographiques suivantes :

23°45' de latitude Nord et 4°40' de longitude Est. N 22° 47' 19.8" E 5° 31' 32.9"

Elle est limitée par :

- La wilaya d'Ouargla au Nord-est
- La wilaya de Ghardaïa au Nord
- La wilaya d'Illizi à l'Est
- La wilaya d'Adrar à l'Ouest
- La république du Mali au Sud-est
- La république du Niger au Sud-ouest

La zone d'étude fait partie de l'Oued Tamanrasset à peu près à 4 km au Nord-est de la ville de Tamanrasset avec les coordonnées suivante : 22°48' et 22°52' Nord, 5°34' et 5°35' Est.

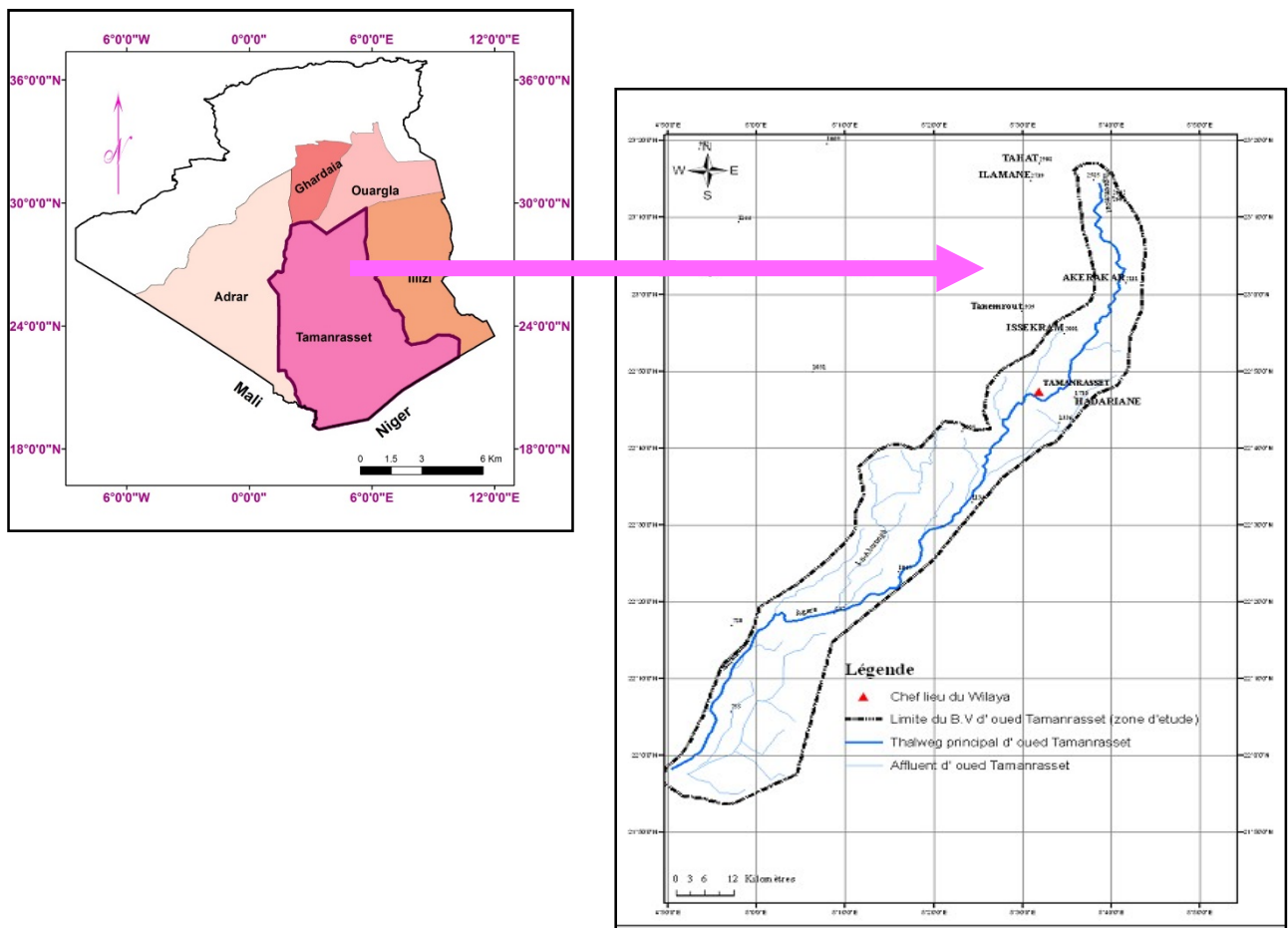


Figure 1 : Carte de situation géographique de la région d'étude

II. Les activités socio-économiques à Tamanrasset :

L'évolution démographique de la ville de Tamanrasset a connu un croissant progressivement. Dans les années trente la population était dépassé 1800 habitants, dans les années suivantes la ville a connu une explosion démographique et a atteint environ 176637 habitants en 2008, la population nomade est estimée à environ 18000 personnes (Bitat.B, 2013).

II. 1. Le tourisme :

Tamanrasset est la plus grande wilaya d'Algérie, une destination pour de nombreux touristes du monde entier. Avec l'un des plus beaux et grands déserts au monde, la wilaya de Tamanrasset est incontestablement une région richement dotée, aux potentialités touristiques indéniables, compte tenu de son patrimoine naturel, culturel et touristique.

Les besoins en eau de ce secteur augmentent d'une année à une autre, la demande touristique totale est au maximum de 75 m³/jour soit plus de 27000 m³/an. (Bitat,B 2013)

II. 2. Les activités agricoles :

La superficie cultivée à Tamanrasset couvre une superficie de 77.7 ha pour une superficie totale agricole de 229 ha. Ces zones sont entre 10 à 15 km longeant de part et d'autre l'Oued en jardins discontinus depuis Talanchouikh en amont jusqu'au sud de la ville de Tamanrasset. A Talanchouikh en amont de Tamanrasset, il existe la plus grande superficie agricole de 26.18 ha avec 20 ha de surface agricole totale utile. La culture à Tamanrasset est présente par les cultures maraichères et fruitières qui demandent l'eau. Les eaux utilisées pour l'irrigation des zones agricoles sont les eaux de crue ou de ruissellement.

Les besoins totale en eaux agricole est de 8055 m³/j. Actuellement les habitants développent des activités agricoles proches des oueds mais leur rentabilité est faible à cause du manque d'eau. (Bitat,B 2013).



Photo n°1 : L'agriculture à Tamanrasset (Bitat,B 2013)

II. 3. Les activités industrielles :

La wilaya de Tamanrasset dispose de potentialités très importantes en :

- **Hydrocarbure** (gaz naturel au niveau du bassin d'Ain Salah) : L'exploitation de 07 champs gaziers par Ain Salah, Gaz (Krecheba, Teguentour, Reg, Hassi Moumen, Gour Mahmoud, Garet Elbifnet et Ain Salah). Les réserves de gaz sont estimées à plus 200 Milliards de m³.

- **Substances métalliques** : représentées par 21 substances réparties en 315 sites Or, Etain, Tungstène...

- **Substances utiles** : représentées par 33 substances réparties en 288 sites (matériaux d'ornementation, matériaux pour agrégat, matériaux d'ajout en industrie, substances utilisables pour amendement agricoles) (ANDI.2013)

D'après les données fournies par la direction des Mines et l'industrie, la demande en eau industrielle totale des entreprises de la ville de Tamanrasset est de 1290m³/na, soit un peu plus de 3.5m³/jour. Ceci est très faible et confirme l'absence d'industries importantes à Tamanrasset. La demande totale industrielle, y inclus les petites industries peut être estimée au maximum à 10m³/j quantité négligeable par rapport aux autre demande. (Bitat,B 2013)

III. Géomorphologie de la région d'étude

III.1.Le relief :

La géomorphologie de la wilaya distingue le plateau du Tidikelt au Nord, et le Hoggar (*Ahaggar*) au Sud, le relief est important au centre du massif cristallin du Hoggar où culminent les hauts sommets tel que Tahat 2918 m, Ilamane 2740 m et Asskrem 2780 m, la topographie varie entre 500 m et 2920m au-dessus du niveau de la mer.

III.1.1.Les Plateaux du Tadmait et du Tinghert :

Situés au Nord et au Nord-Est de la Wilaya, ils se présentent sous la forme de Hamadas et ont l'aspect de deux assises crevassées ; ils sont recouverts par endroits de dunes de sables du fait d'une érosion éolienne très active.

III.1.2.Les plaines :

- La plaine du Tidikelt :

Au Nord (au pied du plateau de Tadmait). Elle est incisée profondément par une succession de vallées qui la traverse dans une direction Est Nord-Est et Sud-Ouest.

- Le Tanezrouft :

Est une vaste plaine située à l'ouest des montagnes du Hoggar dans une immense cuvette synclinale très faiblement inclinée et orientée du nord-nord-est au sud-sud-ouest.

Considérée comme un désert absolu du fait de son extrême aridité et de ses températures extrêmes (les températures maximales sont régulièrement supérieures à 50 °C), cette région totalement dépourvue de végétation n'est pas habitée de manière permanente.

III.1.3. Les Massifs isolés :

Ce sont les massifs d'In-zize d'origine éruptive à l'Est de l'Ahaggar, de Tebertaba (200m) qui est située à l'Est sur la piste de Tamanghasset – Djanet et le versant Nord d'Adrar Nifforas au Sud-Ouest de la Wilaya (Région de Tinzaouatine).

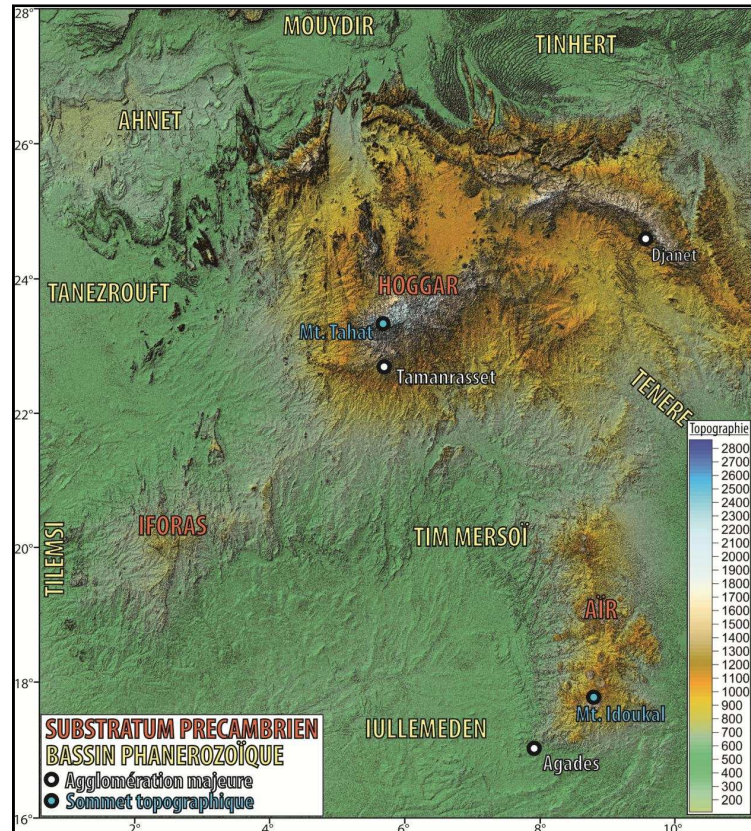


Figure 2 : Image satellitaire de Tamanrasset

IV. L'étude géologique

IV.1. Présentation du Hoggar :

Le Hoggar est un massif cristallin situé dans le sud algérien, il occupe une superficie de l'ordre de 550 000 km². C'est le plus important massif constituant le bouclier touareg qui comprend également l'Adrar des Iforas au Mali au (SW) et l'Air au Niger au (SE)

IV.1.1. La géologie du Hoggar :

Le massif cristallin du Hoggar est caractérisé par une géologie ancienne et très complexe, il est présenté par une vaste boutonnière précambrienne stable depuis le Cambrien qui appartient à la chaîne panafricaine.

Le massif du Hoggar est subdivisé en trois grandes structuro-formation. Ils sont d'Ouest en Est : le Hoggar occidental, le Hoggar central et le Hoggar oriental.

Ces trois domaines sont constitués de plusieurs terrains accolés pendant l'orogénèse panafricaine

IV.1.1.1. Domaine du Hoggar occidental :

Il est appelé aussi la Chaîne Pharusienne (Panafricaine) formé par la collision entre le craton ouest africain à l'Ouest, et le bouclier targui à l'Est pendant l'orogénèse panafricain. Il est limité à l'Est par l'accident 4°50' et à l'Ouest par le craton ouest africain, est séparée en deux parties par l'unité granulitique de l'In Ouzzal (deux rameaux d'affleurement occidental et oriental du Protérozoïque supérieur), le domaine de Hoggar occidentale se compose essentiellement de formations volcano-sédimentaires et plutoniques d'âge Néoproterozoïque (800-540 Ma) avec quelques blocs résiduels de formations d'âge Paléo à Mésoproterozoïque. Ce domaine est constitué des terrains suivants (d'Est en Ouest) : Iskel (Isk) ; In Teideni (It) ; Tin Zaoutène (Za) ; Tirek (Tir) ; Ahnet (Ah) ; In Ouzzal (Ou) ; Tassendjenet (Tas) ; Kidal (Ki) ; Tilemsi (Ti) ; Timetrine (Tim).

IV.1.1.2. Domaine du Hoggar central polycyclique :

C'est un exemple de région précambrienne polycyclique et la partie médian du bouclier limité à l'Ouest par l'accident 4°50' et à l'Est par l'accident de Honedj 8°30', composé essentiellement par des terrains métamorphiques de paléoproterozoïque à mesoproterozoïque «suggarien». et les grabens de ce domaine sont comblés par les formations volcano-sédimentaires d'âge néoproterozoïque.

Composé des terrains suivants (d'Ouest en Est) : Laouni (La) ; Tefedest (Te) ; Azrou-n-Fad (Az) ; Egéré-Aleksod (Eg-Al) ; Sérouenout (Se) ; Tazat (Ta) ; Tchilit (Tch) ; Assode-Issalane (As-Is).

IV.1.1.3. Domaine du Hoggar oriental :

Il est composé par 3 zones : la zone occidentale (chaîne ou série de Tiririne), la zone centrale et la zone orientale (pré -Teririne de Djanet-Tafassesset), ces zones sont séparées par de grands accidents verticaux.

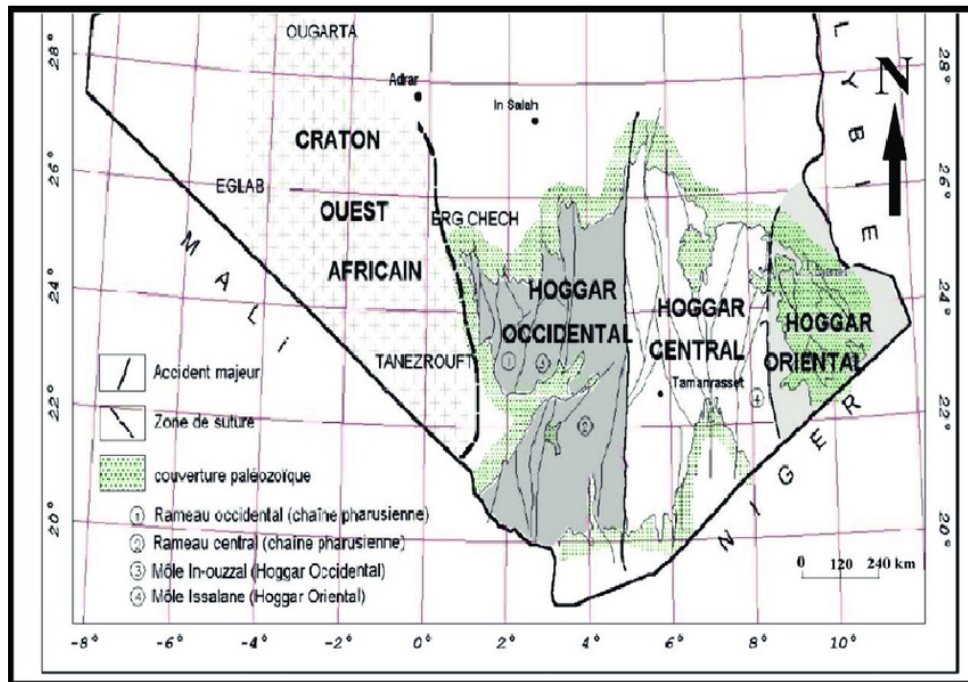


Figure 3 : Carte des principaux domaines structuraux du Hoggar

IV.2. La géologie de la région d'étude :

La région d'étude fait partie du Hoggar centrale, elle est composée par les formations suivantes (figure 4) :

- **Formation paléo à mesoprotérozoïque** : composé par 2 séries :

Une série inférieure formée essentiellement par des gneiss d'origine orthodirivé, et appelée Archchoumet de gneiss quartzo-feldspathique à biotite et grenat, de gneiss rubané à amphiboles, et de gneiss ocellés avec de rares niveaux de marbres, de le ptynites, de quartzites et d'amphibolites

Une série supérieure de nature supracrustale, elle est appelée Egeré-Aleksode (Lelubre ; 1952, Bertrand ; 1974). Elle est composée d'amphibolites parfois à grenat , de gneiss leucocrate à biotite, muscovites, et de gneiss mésocarte à amphibolites, pyroxènes et plagioclases , et de formation metasédimentaire de quartzites à magnétites, de marbre et de schistes alumineux .Cette série renferme localement des lentilles tectoniques et des massifs lopolitiques de roche basique, ultrabasique et amphibolites associés.

- **Formations néoprotérozoïque** : ces formations renferment les séries terrigènes et volcano-sédimentaires :

- **Formations détritiques de Tazat** : Cette série de caractère fluvial deltaïque repose en discordance stratigraphique sur le socle, et est constituée d'une alternance de quartzites, de grés, de calcaires avec des niveaux de conglomérats. (Blaise ;1969, Bertrand et al ; 1968, Itskov et al ;1988)

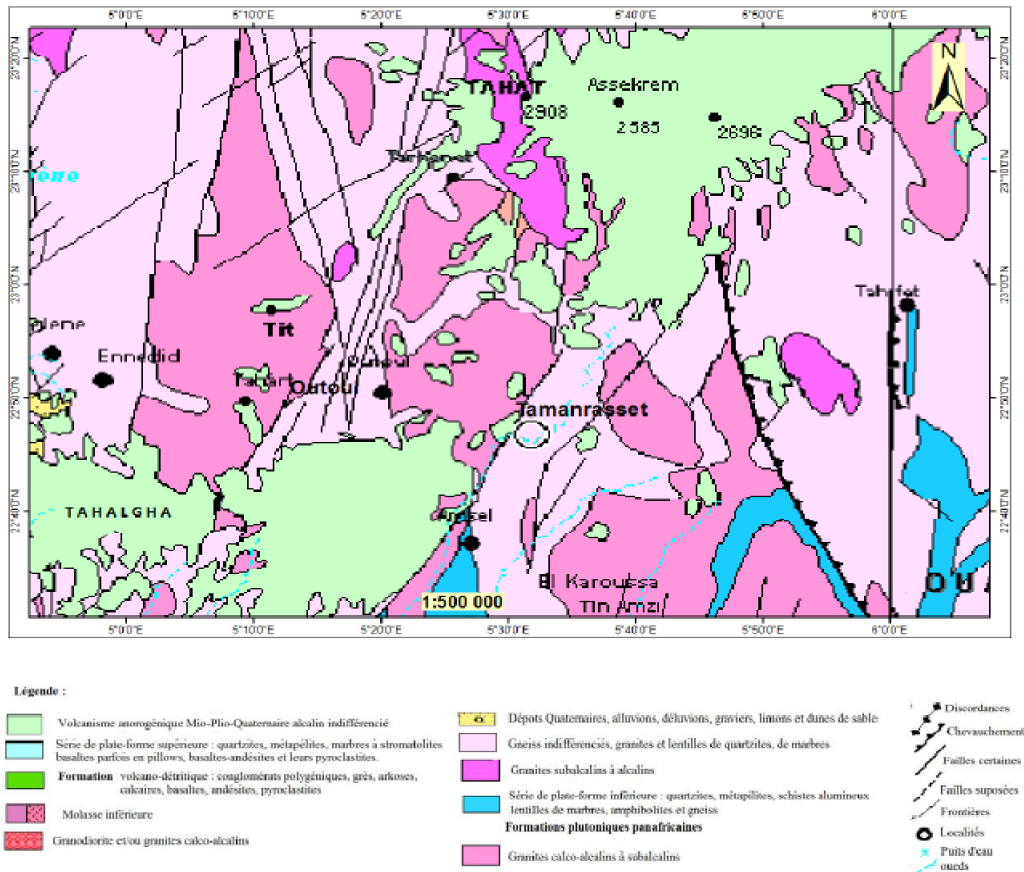


Figure 4 : Carte géologique de la région de Tamanrasset (extrait de la carte géologique du massif du Hoggar, ORGM 2004).

- **Formations volcano-sédimentaires :**

Ces formations affleurent dans des bassins en graben qui sont localisés dans le domaine du terrain de Serouanont et dans la région d'Aghafsa. Elles sont subdivisées en trois séries (Meriem. D.E, Boufassa A. : le Hoggar office national de la recherche géologique et minière (O.R.G.M) :

a) Série de plate-forme : elle est formée par des micaschistes parfois à grenat. Elle est associée avec de niveaux de quartzites, de marbres, de pélites et de sillon et /ou de coulées de met basalte. Cette série est recoupée par des corps des roches basiques – ultrabasiques qui affleurent sous forme d'écailles tectoniques.

b) Série volcano-sédimentaire : elle repose en discordance sur la série précédente. Au serouanont cette série est constituée d'une alternance de grès, de pélites et de greywacks avec des niveaux de schiste noir et de conglomérats. Dans la région d'Aghafsa cette série est subdivisée en deux unités :Unité grésopélitique constituée d'une alternance de grès, de pélites et de marbres avec des sills et/ou des coulées delaves basaltiques et une unité volcanique constituée d'une alternance de roches volcaniques composées de

basaltes, d'andésites et de rhyolites et de niveaux de conglomérats, de grès, de pélites et de graywackes.

c) **Série molassique** : elle affleure en forme de lambeau kilométrique et repose et repose en discordance stratigraphique et angulaire sur la série volcano-sédimentaire. Elle est composée par des conglomérats polygéniques liés avec des niveaux de pélite violace, de marbre, de jaspe, des grès arkosique et de brèches volcanique.

- **Les formations magmatiques du Hoggar central :**

Les formations de ce domaine sont recoupées par des complexes plutoniques pré-, syn-, à tardi –panafricain.(Meriem. D.E, Boufassa A. : le Hoggar (O.R.G.M))

Les complexes plutoniques sont les plus anciens contient des compositions mafique et ultramafique et formés essentiellement par des gros batholites composés de granodiorites, monzogranite à biotite rarement à amphibole et biotite de nature calco-alcaline riche en potassium (batholites HKCA).Les complexes tardif sont généralement de petit plutons circulaires à subcirculaires associés souvent aux zones de cisaillement tardi à post tectonique, ils sont composés de granite à biotite et de granite à amphibole sodique et de suite géochimique sub alcaline et alcaline à hyperalcaline.(Ma, Vitel ; 1979, Viallette et Vitel ; 1979, Bertrand et al ; 1986, Moulahoum ; 1988)

- **Les épanchements volcaniques du Hoggar central :**

Au Hoggar central, les roches volcaniques affleurent en plusieurs plateaux dont les principaux sont Tahalgha, Atakor, Manzaz, Taharaq, et l'Egeré. Ces districts volcaniques s'alignent suivant une direction NE-SW correspondant à un linéament tectonique (linéament de l'oued Amded). Les produit émis sont variés et vont des basaltes aux rhyolites ou aux phonolites.

V. Les caractéristiques climatiques de la région :

La wilaya de Tamanrasset est située dans le sud algérien le climat de la région est sec, la température moyenne annuelle est de 22.48°C. La précipitation moyenne annuelle est de 52.72 mm, l'évaporation est très élevée et atteint en moyenne 4187 mm /an.

L'étude du climat de la région de Tamanrasset est basée sur les données de la station de Tamanrasset

Tableau 6: les coordonnées de la station de Tamanrasset

Station	X	Y	Z
Tamanrasset	22°49'N	5°27' E	1372

V .1.Etude des caractéristiques climatiques de la région :

V .1.1-la précipitation :

Les pluies à Tamanrasset rares et sporadique, est un caractère des régions sahariennes à cause du climat sec. La précipitation annuelle à Tamanrasset pour la période (1980-2015) est de 52.72 mm.

Tableau 7: Précipitation moyenne mensuelle et annuelle de Tamanrasset (1980-2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Cumul
P (mm)	5.5	7.25	0.85	1	1.46	1.28	5.6	1.19	2.56	7.73	7.29	11.01	52.72

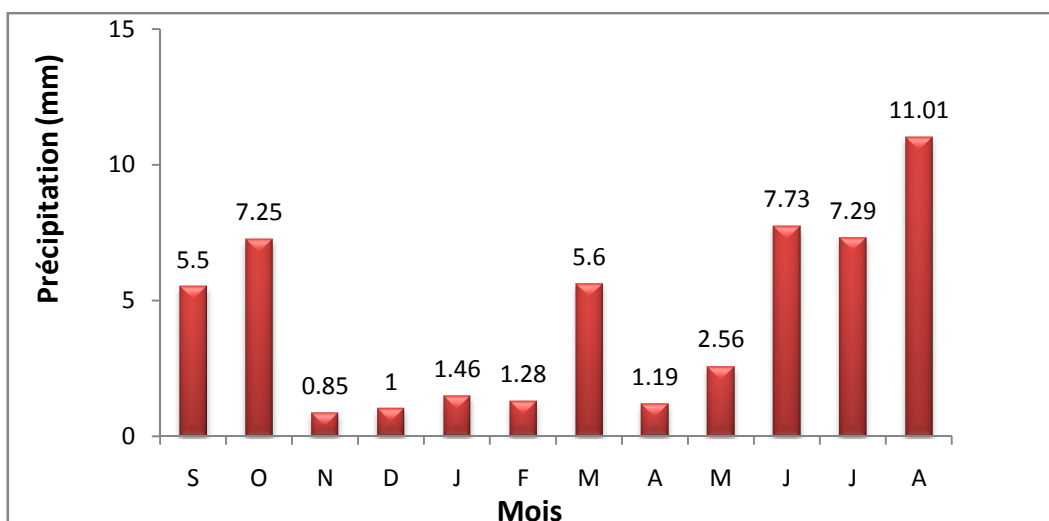


Figure 5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (1980-2015)

L’histogramme de précipitation montre que Août représente le mois le plus pluvieux dans l’année avec 11.01mm, et les mois les plus secs sont Novembre et Décembre avec 0.85mm et 1 mm.

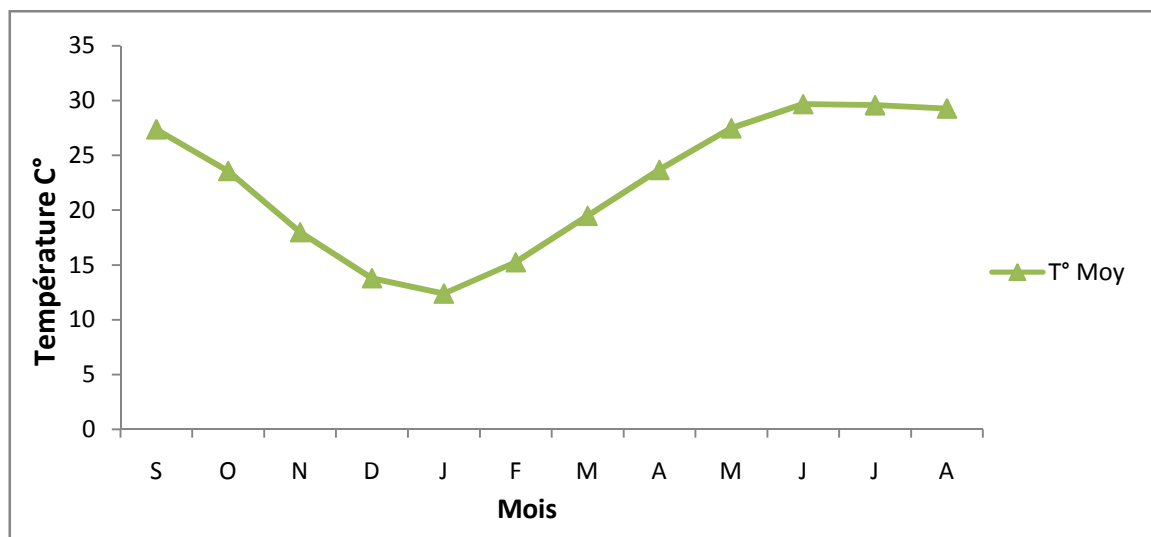
V .1.2.La température :

La température est un paramètre important pour l'analyse du climat, de par sa variabilité, et sa répartition spatiotemporelle. Le tableau ci-dessous, représente la variation des températures durant la période (1998-2018).

Tableau 8:Températures moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (1980-2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne Annuelle
T (°C)	27.4	23.6	18	13.8	12.4	15.26	19.5	23.7	27.5	29.7	29.6	29.3	22.48

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 22.48 C°, le mois le plus chaud est Juin avec 29.7°C, et la température faible est observée en Janvier avec 12.4 °C.



**Figure 6 : Variation de Températures moyennes mensuelles
Station de Tamanrasset (1980-2015)**

V .1.3.Humidité :

La moyenne annuelle de l'humidité dans la région est de 21.25%. La valeur maximale de 26.2 est atteintes en Décembre et minimales de l'ordre de 15.9% en avril.

**Tableau 9 : Humidités moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (Hanni.I)
1980/2015**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne
H (%)	24.4	24	25.3	26.2	23.9	20.9	19.1	15.9	16.4	17.7	18.4	22.8	21.25

V .1.4.Le vent :

La vitesse du vent est supérieure à 4 m/s durant les mois allant de Mars à Juillet avec une valeur maximale égale 4.3 m/s enregistrée en mois de Juillet, la vitesse la plus faible est enregistrée au mois de Décembre 2.6 m/s

Tableau 10 : Vitesses Moyennes mensuelles du vent (en m/s).(Hanni.I)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
V.v (m/s)	3.8	3.3	2.7	2.6	3	3.5	4	4.1	4.2	4.2	4.3	4

V .1.5.L'évaporation :

Les valeurs d'évaporation sont très fortes ceci est due à la température élevée dans la région. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant la période des pluies (de Mai jusqu'à

Aout).Le maximum enregistré est de 562 mm en Juillet et le minimum de 250 mm en Décembre. Le taux annuel d'évaporation est de 4908 mm

Tableau 11 : Evaporations moyennes mensuelles à la station de Tamanrasset (1975-2002) Boulahbal S. (2012)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Ev (mm)	448	381	291	250	258	278	386	464	541	526	562	523	4908

V .2.Les indices climatiques :

V .2.1.Le quotient pluviométrique annuel de Moral :

Proposé par Moral en 1954, cet indice est bien adapté pour la classification des climats dans la zone intertropicale. Il se calcule, selon la formule suivante :

$$IM = \frac{P}{T^2 - T10 + 200}$$

Avec :

P : les hauteurs annuelles des précipitations en mm.

T : les températures moyennes annuelles en °C.

On peut distinguer deux types de climat à partir de cet indice :

Si $I_M < 1$ → le climat est sec

Si $I_M > 1$ → le climat est humide

Après les calculs par l'utilisation de la formule, le résultat (Tableau.13) montre que le type de climat de Tamanrasset est sec.

Tableau 12 : Résultat des calculs de l'indice d'aridité de Moral

P	T	Im	Type de climat
52.72	22.48	0.1	Sec

V .2.2-Indice d'aridité de De Martonne :

L'indice d'aridité (De Martonne, 1926) est défini comme le rapport entre la moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles :

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

Avec :

I : Indice d'aridité de De Martonne

P : précipitation moyenne annuelle(en mm)

T : Température moyenne annuelle (en °C)

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Une faible aridité correspondant à des pluies abondantes et/ou des températures basses. De Martonne a proposé différents types de climats selon les valeurs de l'indice annuel (Tableau14).

Tableau 13 : Indice de De Martonne

Valeur de I	Type de climat
0 – 5	Hyper aride
5 – 10	Aride
10 – 20	Semi-aride
20 – 30	Semi-humide
30 – 40	Humide

Après les calculs par l'utilisation de la formule de De Martonne, le résultat (Tableau15) montre que le type de climat de Tamanrasset est Hyper aride.

Tableau 14 : Résultat des calculs de l'indice d'aridité de De Martonne pour Tamanrasset

P (mm)	T (C°)	I	Type de climat
52.72	22.48	1.7	Hyper aride

V .2.3.Indice ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN :

BAGNOULS et GAUSSEN (1952) ont établi des diagrammes ombrothermiques, l'objectif de ces diagrammes est l'évaluation de la durée et l'intensité de la saison sèche pendant l'année.

Ils se sont basés sur la formule :

$$P = 2 T \text{ °C}$$

P : précipitations moyennes mensuelles (en mm)

T : température moyennes mensuelles (en °C)

Les mois secs sont définis, quand la courbe des précipitations est située au-dessous de celle des températures moyennes.

Ces graphiques permettent de suivre facilement la suite des saisons et l'importance de leur sécheresse.

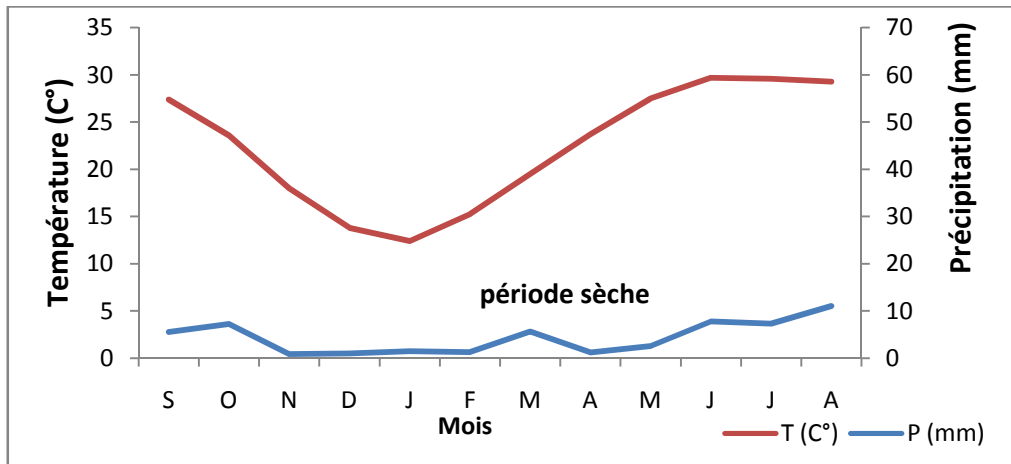


Figure 7 : Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1952)

V.3.Evapotranspiration

L'ETP peut se définir comme la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée dans des conditions climatiques données par une surface d'eau libre, ou un couvert végétal pour lequel l'eau n'est pas un facteur limitant. L'ETR se définit comme la réponse, en termes de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'ETP, compte tenu de la quantité d'eau disponible (Cosandey et Robinson, 2001).

V .3.1-Estimation de l'évapotranspiration réelle et potentielle :

1. Méthode de Thornthwaite :

La méthode de Thornthwaite permet de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la formule suivante :

$$ETP = 16 \left[\frac{10T}{I} \right]^a$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)

T : température moyenne mensuelle (°C)

I: indice thermique annuel

$$I = \sum i$$

i : indice thermique mensuel

$$i = \left| \frac{t}{5} \right|^{1.514}$$

a : exposant climatique donné par L.Serra en 1954

$$a = 0.0161I + 0.5$$

Tableau 15 : bilan hydrique estimée par la méthode de Thornthwaite à Tamanrasset période (1980-2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Cumul
T (C°)	27.4	23.6	18	13.8	12.4	15.6	19.5	23.7	27.5	29.7	29.6	29.3	22.48
P	5.5	7.25	0.85	1	1.46	1.28	5.6	1.19	2.56	7.73	7.29	11.01	52.72
I	13.5 54	10.55 37	7.11 9	5.049 37	3.55 69	5.41 6	7.57 74	10.1 65	13.1 1	14.75 2	15.0 3	14.49 6	120.379
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	
ETP	121. 1	79.3	36.4	18.0	14.9	25.4	53.0	90.9	143. 5	174.4	175. 8	160.5	1093.4
ETR	5.5	7.25	0.85	1	1.46	1.28	5.6	1.19	2.56	7.73	7.29	11.01	52.72
Def	115. 6	72.09 9	35.5 9	17.00 19	13.4 52	24.1 6	47.4 07	89.7 22	141	166.6 95	169	149.5	1040.66
Exc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les valeurs de l'ETP obtenues par l'application de la méthode de Thornthwaite pour la période 1980-2015 (tableau 16) montrent que le mois à ETP élevée est le mois de Juillet avec 175.8 mm et le taux annuel est de l'ordre de 1093,4 mm.

2. Méthode de Turc :

La méthode de Turc est la plus utilisée pour l'estimation de l'ETP en climat aride, selon la formule suivante :

Si **Hr** **50%** on a : **ETP = k (Ig + 50) t/(t + 15)**

Si **Hr** **50%** on a : **ETP= k(Ig + 50) t/(t + 15). (1+50-Hr/70)**

k = 0.37 pour Février k = 0.40 pour les autres mois

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/mois),

Hr : Humidité relative moyenne (%)

t : température moyenne mensuelle (°C)

Ig : radiation globale solaire mesurée ou calculée par :

$Ig = I_{gA}(0.18 + 0.62 h/H)$

IgA : radiation globale théorique en (cal/cm2/jour).

H : durée maximale d'insolation (théorique) en heure par mois.

h durée d'insolation mesurée pendant le mois considéré en heure par mois.

Tableau 16 : Valeurs de l'évapotranspiration potentielle estimée par la méthode de Turc à Tamanrasset période (1980/2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	cumul
T (°C)	27.4	23.6	18	13.8	12.4	15.6	19.5	23.7	27.5	29.7	29.6	29.3	
Hr (%)	22.4	24	25.3	26.1	23.9	20.9	19.1	15.9	16.4	17.7	18.4	22.8	
IgA (cal/cm ² /jr)	832	735.6	630.4	581.8	615.2	710.4	820	897.6	934	941.6	935	899.8	
H	373.8	347.2	304.5	296.05	304.11	299.32	370.76	396	443.6	444.3	448.3	422.2	
h	232	279	282	281	282	272	289	293	291	249	288	269	
Ig(cal/cm ² /jr)	474.61	484.74	444.88	408.21	427.26	502.86	541.52	590.89	579.00	529.00	571.35	537.75	
ETP (mm)	134.39	134.24	114.64	95.28	93.12	109.05	134.27	152.69	154.78	145.29	156.82	150.11	1574.68

Les valeurs de l'ETP obtenues par l'application de la méthode de Turc (tableau 17) montrent que le mois à ETP élevé est le mois de Juillet avec 156.82mm et le taux annuel est de l'ordre de 1574.68mm.

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées sont très élevées par rapport aux précipitations. Elles reflètent le type de climat de Tamanrasset (climat hyperaride).

Les calculs de l'ETP par les deux méthodes Thornthwaite et Turc donnent des résultats proches

VI. Conclusion :

La région de Tamanrasset située dans le grand sud algérien (Hoggar centrale), elle s'étend sur une superficie totale de 557 906 Km².

L'évolution démographique de la ville de Tamanrasset a connu un croissant progressivement et a atteint environ 176637 habitants en 2008, la population nomade est estimée à environ 18000 personnes

L'étude géologique montre que la majeure partie de la région est occupée par des formations gneissiques

paleoprotérozoïques, recoupées par du granite panafricain et des épanchements basaltiques plio-quaternaires et des alluvions qui recouvrent le lit de l'oued Tamanrasset.

L'étude climatologique a permis de déterminer le climat de la région à l'aide de différentes méthodes. Ainsi, il s'agit d'un climat hyper aride caractérisé par un hiver doux avec une température moyenne annuelle de 22.48°C. La lame d'eau précipitée enregistrée est de 52.72

mm tandis que l'évaporation mesurée au niveau de la station de Tamanrasset est de 4908 mm.

Il s'agit d'une forte évaporation régit par des températures élevées.

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées par les deux méthodes (Thornthwaite et Turc) sont très élevées par rapport aux précipitations, elles sont respectivement de 1093.4 mm/an et 1574.68 mm/an. Elles reflètent le type de climat de Tamanrasset (climat hyperaride).

Chapitre 3
Etude hydrogéologique

I. Introduction

Dans les zones sahariennes les ressources essentielles en eaux sont souterraines car les eaux superficielles sont rares. Les réservoirs souterrains du Sahara constituent d'immenses réserves d'eau à composante essentiellement ancienne (fossile). La protection des eaux souterraines est très importante car elles sont la ressource la plus utilisable dans les régions sahariennes.

La cartographie est un moyen utilisé pour éviter la contamination des nappes.

Le but de ce chapitre est la présentation des caractéristiques hydrologiques du bassin de l'oued Tamanrasset et l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale qui a permis de déterminer le sens d'écoulement et mettre en évidence la variation du niveau de la nappe.

II. Hydrologie du bassin de l'oued Tamanrasset :

II.1. Description du bassin de l'oued Tamanrasset :

Le bassin de l'Oued Tamanrasset s'étend sur une superficie de 4200 km² et fait partie du grand bassin de Tanezrouft. **L'oued Tamanrasset** prend naissance au Sud d'Atakor dans la région d'Assekrem. Vers 2700 m d'altitude, il descend suivant une direction SSW. Le bassin de l'Oued Tamanrasset est tranché en trois tronçons :

- Un premier tronçon montagneux de 200 km de long suivant une direction générale orientée vers le SSW, comprenant les vallées supérieures et moyennes. Les importantes crues de l'Oued sont créées dans ce tronçon

Plusieurs cours viennent se déverser dans l'oued Tamanrasset (Fig.8) :

- Oued In Ezzebib qui vient de Tin Hamor, où se trouve la source Tahabort et se joint au oued principal dans la région de Tifiguine.
- Oued Sersouf et Oued Tahaggart qui viennent de Idoukal au Sud de l'Isskrem et se joignent à l'Oued Tamanrasset à Tilmas Tibegouine.
- Oued Tizelaïne qui rejoint l'oued Tamanrasset dans la plaine de Tehendi.

Désormais, le tracé de l'Oued Tamanrasset est difficile à suivre, néanmoins, il ne cessera de s'élargir, en coulant toujours vers le sud où il devient un oued mort.

Cependant, il subit un léger rétrécissement à Timgaouine, il tourne brusquement vers le Nord-Ouest.

La vallée devient immense, les seuils rocheux ne sont plus sensibles, il présente à des endroits un aspect de reg absolument plat.

- Un second tronçon de plaine encore actif de 200 km environ de long, situé à l'extrémité orientale du Tanezrouft où la vallée s'élargit et n'est plus limitée que par des berges peu marquées et parfois occupées d'amas dunaires. Après un premier coude (à Timdjaouine), l'oued coule vers le NNW puis se redresse et repart vers l'Ouest, où il reçoit 03 grands affluents : l'Adjemet-Tinef, Adjelman et Ameded.

- Le troisième tronçon, entièrement dans le Tanezrouft, est un tronçon terminal de plaine entièrement fossile et assez mal connu.

Le principal affluent du Tamanrasset est actuellement l'Oued Amded, il prend sa source dans la région de Tahat, vers 2800 m d'altitude sous les noms de l'Illamane, d'Afara-n-Zouzden, Tit et Abelessa, il parcourt 140 Km et descend de plus de 2000 m, devenu Amded, sa vallée s'élargit et gagne 140 Km plus loin, à travers le Tanezrouft, son confluent l'oued Tamanrasset.

L'oued est à sec presque toute l'année hormis quelques crues, parfois violentes, pendant la crue du 11 Mai 2014 a été mesurée des débits de l'oued au niveau de la ville de Tamanrasset et a donné des valeurs qui varient entre 0,5 et 5,24m³/s (Taringa et al, 2015)

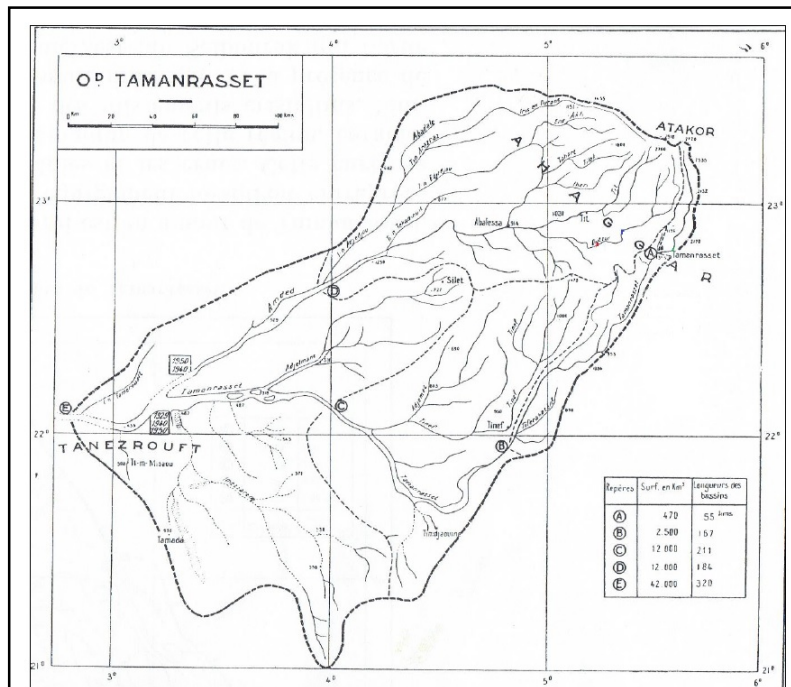


Figure 8 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Tamanrasset (J. Dubief, 1953)

II.2. Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Oued Tamanrasset :

L'étude morphométrique de bassin versant a pour but la détermination des caractéristiques géométriques du bassin. La forme de bassin influence sur le temps de concentration, les bassins en forme d'éventail présentant un temps de concentration plus court que les bassins en forme allongé.

Dans la région de Tamanrasset, nous présentons à partir des travaux antérieurs (Bouahbal S. 2012), les caractéristiques suivantes :

II.2.1. La surface :

Pour déterminer la surface d'un bassin versant on peut utiliser un planimètre ou à l'aide de la technique de digitalisation, la surface du bassin versant de l'Oued Tamanrasset est de l'ordre de 2876 km²

II.2.2. Le périmètre :

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km, de la ligne de contour du bassin; sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels, le périmètre du bassin versant de l'Oued Tamanrasset est de l'ordre de 401 km

II.2.3. Forme du bassin versant :

Elle est caractérisée par l'indice de compacité de Gravelius donné par la formule :

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

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravelius

A : surface du bassin versant (km²)

P : périmètre du bassin versant (km)

Si K_G est proche de 1 → forme quasiment circulaire

Si K_G est supérieur à 1 → forme allongée.

Pour notre bassin versant $K_G = 2.09$ il est ainsi caractérisé par une forme allongée. Cette forme va influencer sur le débit de pointe de crue qui est faible dans ce cas.

II.2.4. Rectangle équivalent :

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle.

Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes :

La longueur
$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{1.12}{K_G}} \right]$$

La largeur
$$l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1.12}{K_G}} \right]$$

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravelius

A : superficie de bassin versant en km²

L : longueur du rectangle équivalent en km

l : largeur du rectangle équivalent en km

Pour notre bassin, la longueur et la largeur du rectangle équivalent sont respectivement 100.05 km et 35.86 km

II.2.5. Longueur du cours d'eau principal :

C'est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux exprimée en km, la longueur de cours d'eau principale de notre région d'étude est de 203km.

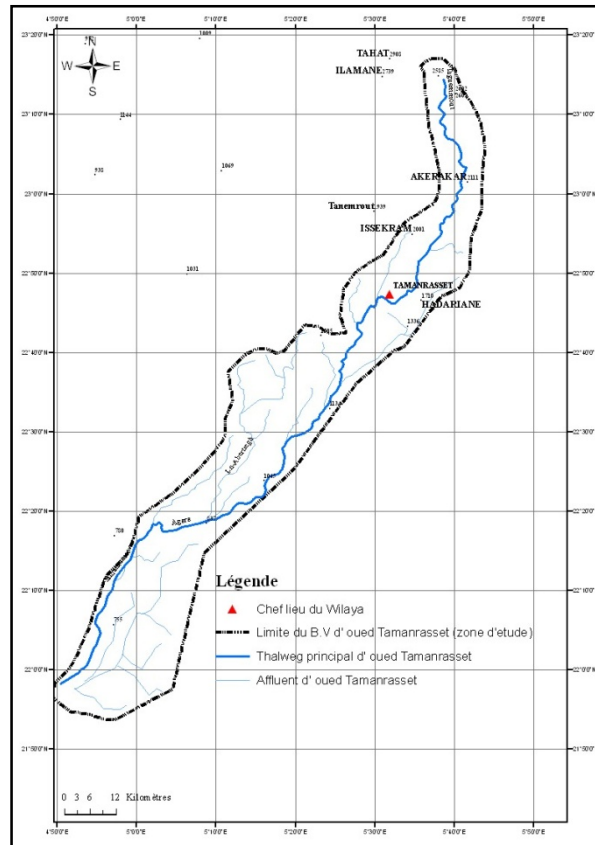


Figure 9 : Bassin versant zone d'étude

III. Hydrogéologie du bassin de l'oued Tamanrasset :

Dans les zones sahariennes, la ressource en eau est principalement souterraine. A Tamanrasset les nappes d'inféoflux sont des ressources très importantes et sont exploitées pour satisfaire les besoins locaux. La recharge de ces nappes alluviale est assurée par les crues de l'Oued. La qualité des eaux de la nappe alluviale à Tamanrasset est très bonne mais sont très vulnérable à la pollution.

III.1. Les aquifères capté dans la région :

Le système hydrogéologique de la région de Tamanrasset est lié aux Oueds (relation avec l'Oued) et représenté sur 3 niveaux superposés (Taringa et al, 2015) :

- a) **Les alluvions superficielles (nappes d'inféoflux) :** représente une ressource essentielle en eaux composés par des sables fins, moyens et grossiers, avec une épaisseur de 21 m, la nappe est alimentée essentiellement par les crues de l'oued donc le niveau piézométrique vari selon l'intensité des pluies. Dans la période

pluvieuse, le niveau peut remonter de 1 à 2 m et rabattre de la même hauteur ou même du double dans la période de sécheresse.

- b) **La couche altérée** : est composée de gneiss altéré à intercalation de couches argileuses, de graviers et de débris de minéraux (quartz et feldspath). Parfois, c'est des gneiss schisteux à débris de quartz et mica-noir. C'est aussi du schiste altéré traversé par un filon de pegmatite et parfois du granite clair à orthose riche en chlorite. La profondeur de la couche altérée varie de 0 à 68m avec une épaisseur minimale de 1,8 m et maximale est de 44 m
- c) **L'aquifère de socle** : alimenté par les eaux infiltrées à travers les deux niveaux précédents, composé par des gneiss, granite ou schiste, il se trouve à une profondeur de 2 à 83m.

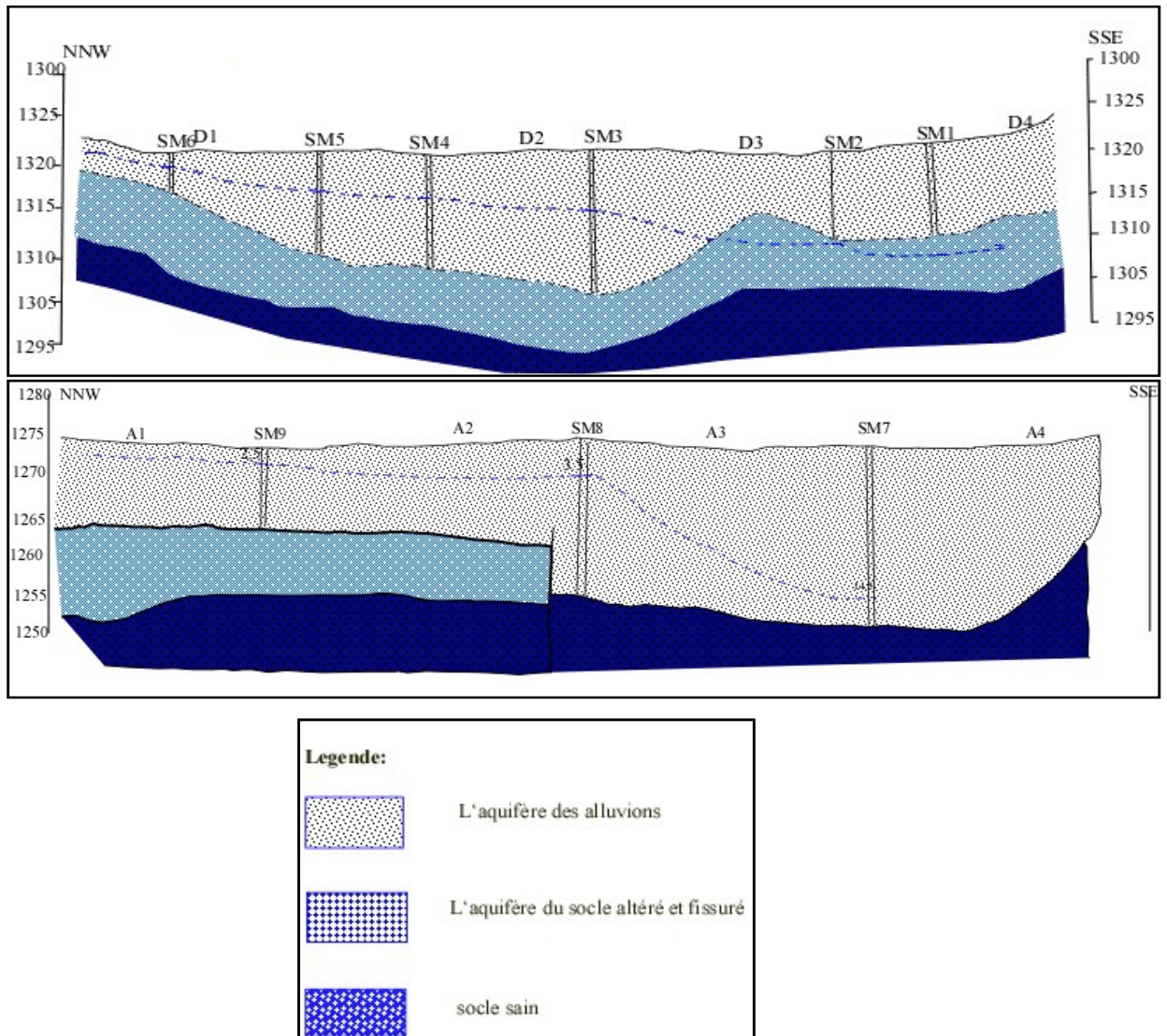


Figure 10 : Coupe hydrogéologique (Boulaahbal.S 2012)

III.2. La piézométrie de la nappe :

L'objet des cartes piézométriques est de définir les directions et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines en conditions naturelles, donc s'il ya une pollution potentielle les études piézométriques permettent de suivre le sens de migration de cette pollution ainsi que l'identification des zones de recharge et d'émergence.

III.2.1. La carte Piézométrique de la campagne de Mars 2014 :

La carte de la figure (11) a été établie à partir de mesures réalisées au niveau de 32 puits, au cours de l'année 2014 à l'aide du logiciel surfer (version 13).

Les données ont été obtenues en période de basses eaux. Le niveau statique varie entre 10.5m et 31.2m.

L'observation de cette carte piézométrique montre que le sens d'écoulement est du nord-est vers le sud-ouest. Le niveau piézométrique varie de 1446m au Nord à 1371m au Sud.

Les courbes dans la carte sont espacées ce que indiquent un faible gradient hydraulique qui varie entre 0.004 et 0.006 donc une forte perméabilité.

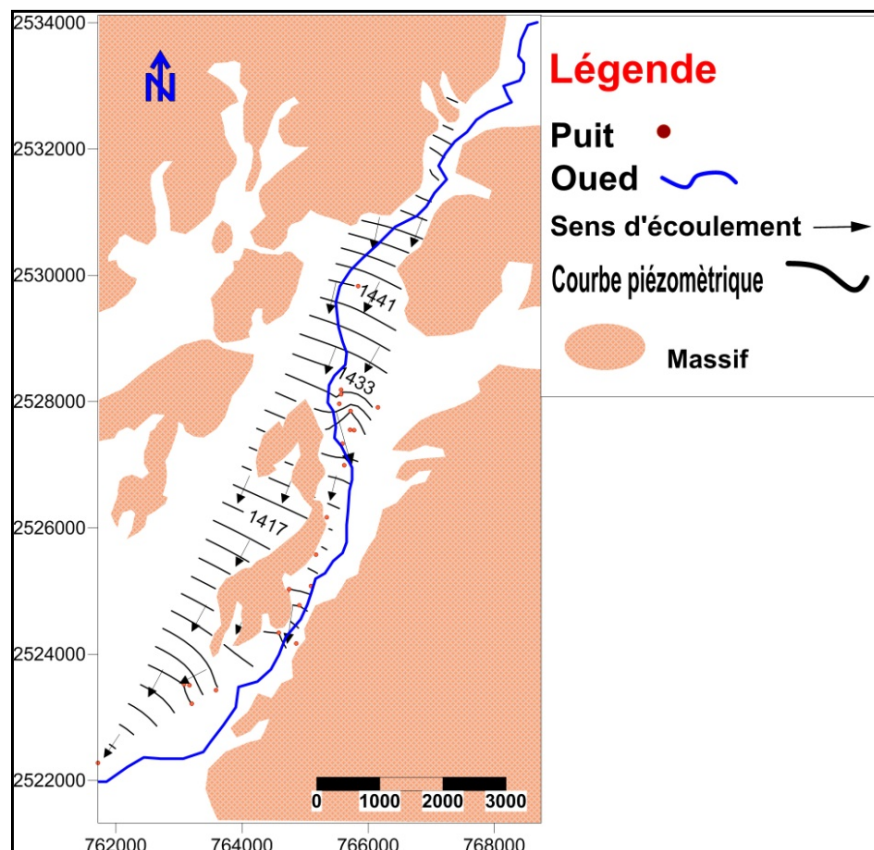


Figure 11 : Carte piézométrique de la nappe d'Oued Tamanrasset Mars 2014

III.2.2. La carte piézométrique de la campagne de Novembre 2014 :

La carte de la figure (12) a été établie à partir de mesures réalisées au niveau de 36 puits au cours de l'année 2014,

Les mesures sont effectuées après la période pluviale dans la région. Le niveau statique varie entre 11.9 m et 32 m dans l'ensemble des points de mesures.

La carte montre que le sens d'écoulement est du nord-est vers le sud-ouest et le gradient hydraulique varie entre 0.009 et 0.006.

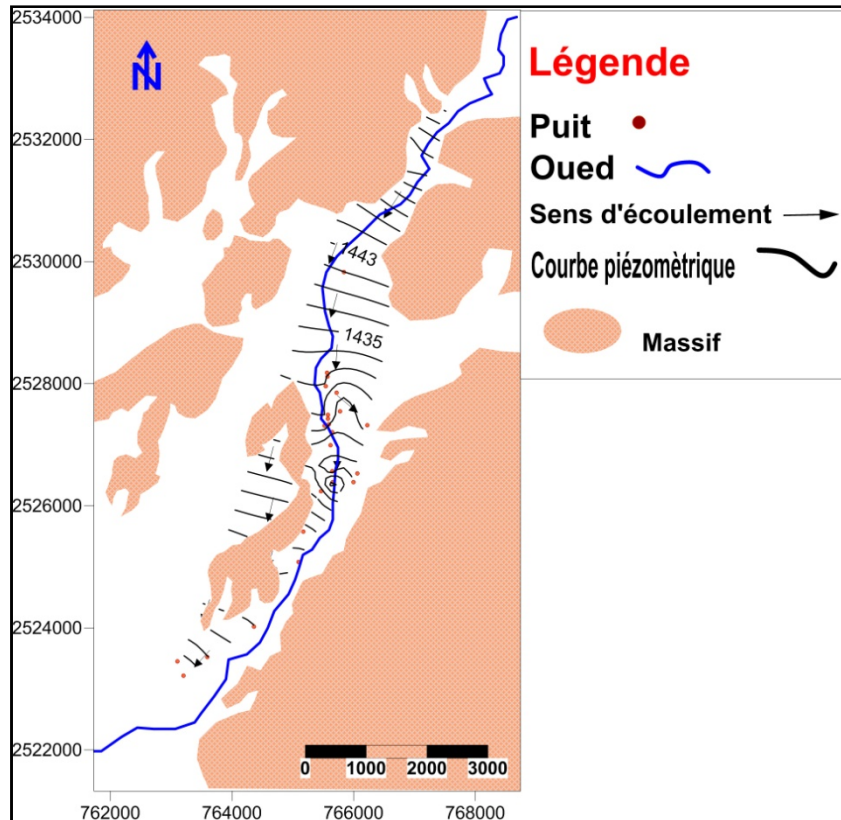


Figure 12 : Carte piézométrique de la nappe d'Oued Tamanrasset Novembre 2014

IV. Conclusion :

L'étude hydrologique a permis de connaître les différentes caractéristiques morphométriques du bassin de la région d'étude. C'est un bassin de forme allongé qui s'étend sur une superficie de 2876 km².

L'étude hydrogéologique montre 3 niveaux aquifères superposés :

- **Les alluvions superficielles (nappes d'inféro-flux)**
- **La couche altérée**
- **L'aquifère de socle**

Les cartes piézométriques établies pour les 2 campagnes (Mars et Novembre 2014) montrent que le sens d'écoulement de la nappe est de nord-est vers le sud-ouest. Le gradient

hydraulique est faible dans toute la zone d'étude. Ceci permet de conclure que la diffusion d'un éventuel polluant serait facile dans la plupart de la zone d'étude.

Chapitre 4

Etude de la vulnérabilité à la pollution

I. Introduction :

La cartographie de la vulnérabilité des aquifères est un outil efficace pour délimiter les zones à risque des aquifères et pour une meilleure gestion des ressources en eau. Ces cartes sont très utilisées par les spécialistes de l'eau, mais aussi pour l'utilisation et la planification des terres (Margane 2003).

Dans le but d'étudier la vulnérabilité de la nappe alluviale de l'Oued Tamanrasset nous avons utilisé les méthodes DRASTIC et GOD. Avec le peu de données qu'on dispose, nous avons essayé de tracer la carte de la vulnérabilité à la pollution de la nappe de Tamanrasset par l'utilisation du logiciel Surfer 13.

II. Elaboration des cartes des paramètres spécifiques de la vulnérabilité de la nappe :

II.1. Carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC :

Tableau 17 : Données utilisées pour le calcul de la vulnérabilité (M Edilasioet al.,2015)

Paramètre	Principale source d'information
D Profondeur de l'eau	Coupes des forages Campagne piézométrique
R Recharge efficace	Etude hydrogéologique Etude climatologique
A Zone saturée	Coupe lithologique des forages Etude hydrogéologique
S Type de sol	Etude pédologique
T Topographie	Carte des pentes
I Zone non saturée	Coupe lithologique des forages Etude hydrogéologique
C Perméabilité	Etude hydrogéologique Essais de pompage

II.1.1. Profondeur de la nappe : D

La profondeur de la nappe correspond à la zone non saturée (ou zone vadose) qui est la zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. L'épaisseur de la zone non saturée joue un rôle important dans la qualification de la capacité de l'aquifère à être affecté par l'infiltration d'un polluant. Plus la zone non saturée est épaisse, plus elle joue un rôle épuratoire des eaux d'infiltration.

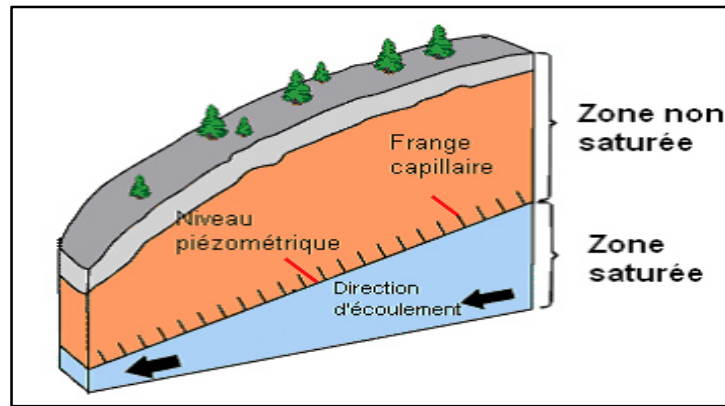


Figure 13 : Schéma représentant la zone non saturée

(Source : <http://geology.er.usgs.gov/eespteam/brass/ground/groundintro.htm>)

Pour la réalisation de la carte de profondeur de la nappe alluviale de Tamanrasset, parmi les données qu'on dispose, nous avons utilisé celles de la campagne piézométriques du mois d'Août 2016 où le niveau de la nappe était le plus haut. Les mesures de cette campagne montrent que le niveau minimal de la nappe est de l'ordre de 6.6m et le niveau maximal est de 26.8 m.

A partir de ces résultats, nous avons 4 classes allant de 4.5m à 30m. La majeure partie de la nappe est située entre 9 et 22 mètres de profondeur. Selon le modèle DRASTIC les cotations de ce paramètre varient entre 2 et 7.

Tableau 18 : Poids, Note et indice du paramètre de la profondeur de la nappe

Classe	Note	Poids	Indice
4.5 – 9	7	5	35
9 – 15	5	5	25
15- 22.5	3	5	15
22.5 – 30	2	5	10

L'observation de la carte de la profondeur de la nappe montre que la très faible profondeur de 9 à 15m occupe la majeure partie de la nappe. Elle est située au Nord et s'étend vers l'Est jusqu'au centre de la zone d'étude. La moyenne profondeur variant entre 15 et 22.5m est située au centre et s'étend au Sud de la zone. Enfin, la forte profondeur dépassant 22.5m est observée dans la partie aval de l'aquifère. Dans cette zone proche de la ville de Tamanrasset, la nappe sera ainsi considérée comme moins vulnérable à la pollution.

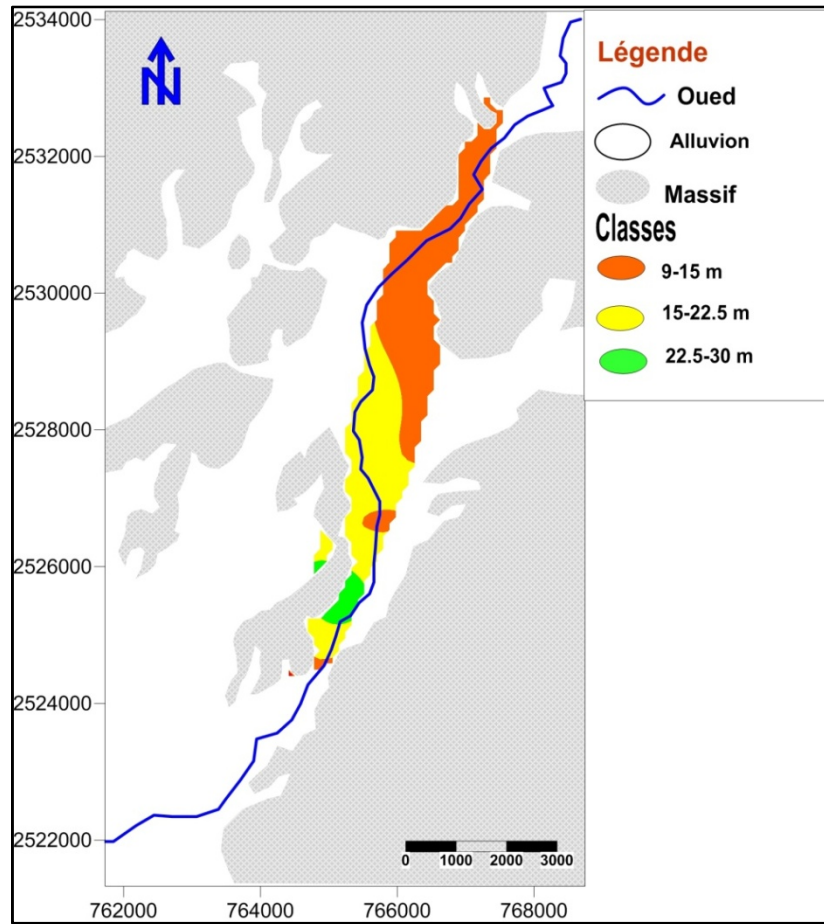


Figure 14 : Carte de la vulnérabilité relative à la profondeur de la nappe

II.1.2.Recharge : R

La recharge nette annuelle est la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée, elle reflète le transfert d'un éventuel polluant vers les eaux souterraines.

Les régions désertiques reçoivent de très faibles quantités d'eau de manière très irrégulière (<50 mm/an). Cette recharge en eau souterraine qui peut véhiculer des polluants, ne s'effectue pas sur la totalité de l'épaisseur des aquifères. Dans les systèmes aquifères elle s'écoule principalement à proximité du niveau statique (Seiler & Lindner 1995).

Dans notre région d'étude la recharge de la nappe se fait par les crues de l'Oued Tamanrasset. Une notation de 1 est attribuée à toute la zone d'étude.

Tableau 19 : Poids, Note et indice du paramètre de Recharge

Classe	Note	Poids	Indice
0-50 mm	1	4	4

II.1.3.Nature de la zone saturée : A

La zone saturée est la zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches formant, dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine.

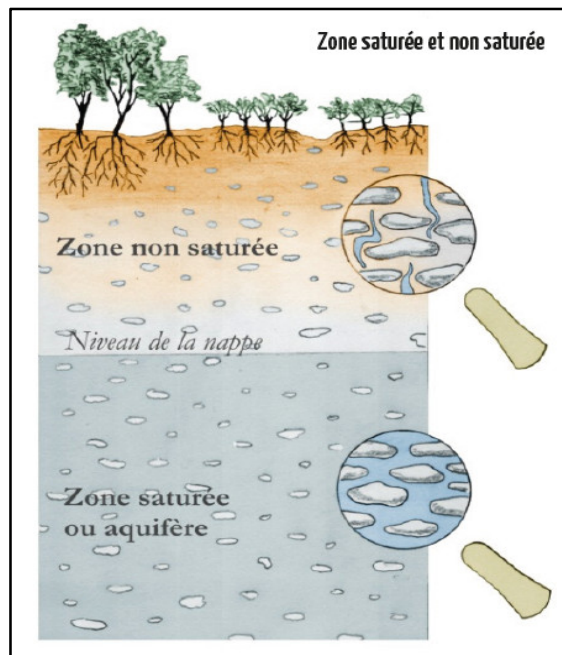


Figure 15 : Schéma représentant la zone saturée

Source : Site du SIGES Poitou-Charentes

Le rôle de ce paramètre dépend de la nature lithologique et texturale des formations qui constituent le milieu aquifère. Le degré de porosité des terrains qui constituent l'aquifère et la perméabilité d'interstices et des fissures détermine le potentiel de pollution.

Ce paramètre a été déterminé par la description des logs de forages. L'observation du tableau (21) qui représente la description lithologique du forage F18 montre que la lithologie de l'aquifère est représentée par une couche des alluvions (sable, limon, galets) surmontant une couche d'altérites qui représente le produit d'altération du substratum schisteux. L'ensemble repose sur un socle schisteux sain.

Tableau 20 : Les caractéristiques lithologiques de l'aquifère au niveau de forage F18

Profondeur	Lithologie	Zone
0 -3	Limon, sable moyen et galets	Alluvions
3-8	Sables moyens et débris de roches cristallophyllienne et volcanique	
8-17	Sable grossiers et galets	
17-20	Roche altéré (schistes)	Altérites
20-32	Schiste altéré traversé par un filon de pegmatite	
32-40	Substratum schisteux	Socle

En prenant en considération la profondeur minimale de la nappe qui est à 6m et la lithologie du forage F18, pris comme exemple, la zone saturée sera représentée par les sables moyens et débris de roches cristallophyllienne et volcanique, les sables grossiers et les altérites. Les indices DRASTIC calculés pour ce paramètre sont respectivement 24 et 12 pour les sables et les formations métamorphiques altérées (tableau 22)

Ces formations sont caractérisées par une forte perméabilité qui varie entre 10^{-2} à 10^{-4} m/s. La zone saturée est ainsi caractérisée par une bonne perméabilité, ce qui facilite la propagation rapide d'un polluant. D'après ce paramètre l'aquifère est considéré comme très vulnérable

Tableau 21 : Poids, Note et indice du paramètre de la nature de la zone saturée

Classe	Note	Poids	Indice
Sable	8	3	24
Métamorphique altérées	4	3	12

II.1.4.Type de sol : S

La surface du sol, par sa nature perméable ou imperméable, peut entraîner les polluants vers l'aquifère. Ce facteur joue un rôle important quant à la détermination des zones polluées.

Les caractéristiques du sol contrôlent les mouvements descendants des contaminants. En effet, la présence de matériaux fins (argiles, silts et limons) et de la matière organique dans le sol diminue la perméabilité intrinsèque, et retarde la migration des contaminants, par les processus physico-chimiques adsorption, échange ionique, oxydation, biodégradation. En effet, plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.

Par ailleurs, le contenu microbiologique du sol peut épurer le sol de ses substances indésirables.

Pour évaluer ce paramètre dans la zone d'étude, nous avons tracé des courbes granulométriques de deux échantillons à deux profondeurs différentes (figure16, figure 17) ce qui nous permet de connaître le type de sol dominant dans la région.

Les courbes du premier point d'échantillonnage pris à 20 et 60 cm de profondeur (fig16) montrent que le gravier est les matériaux dominant. Les courbes du deuxième point d'échantillonnage prélevé à 30 et 60 cm (figure 17) montrent que les matériaux dominant est les sables moyens et fins.

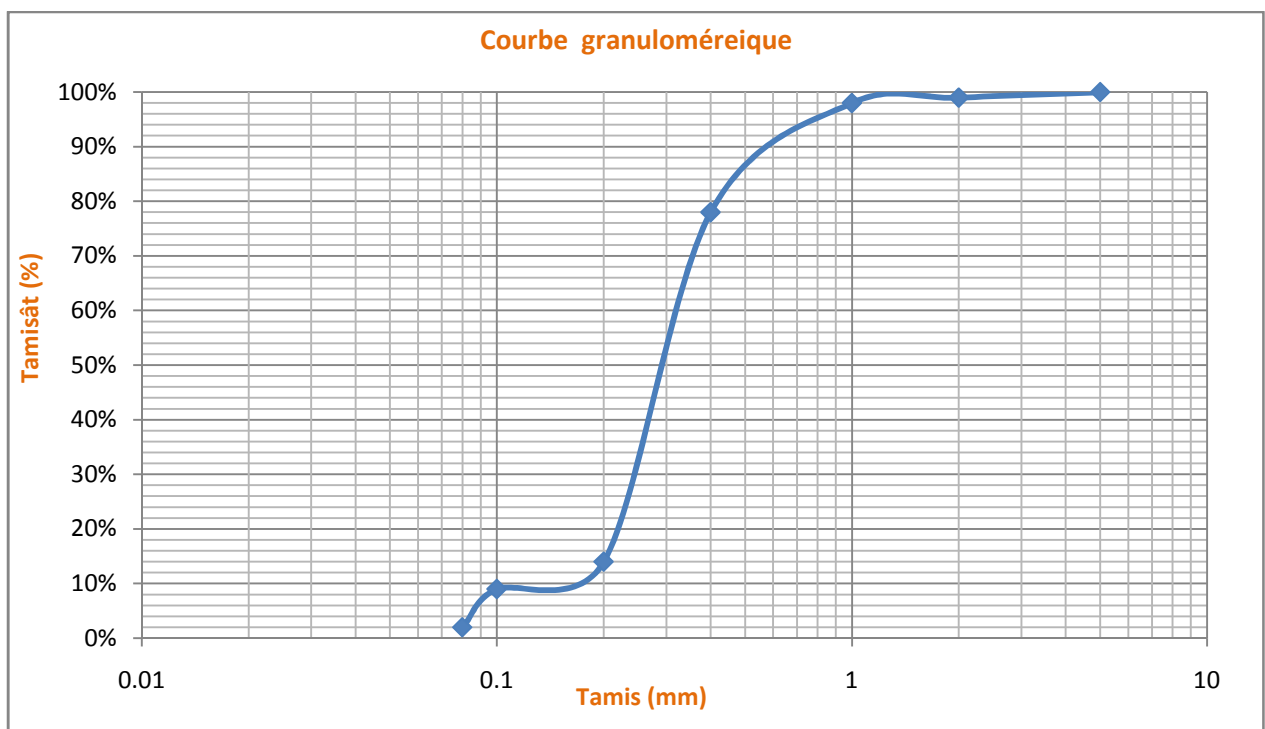
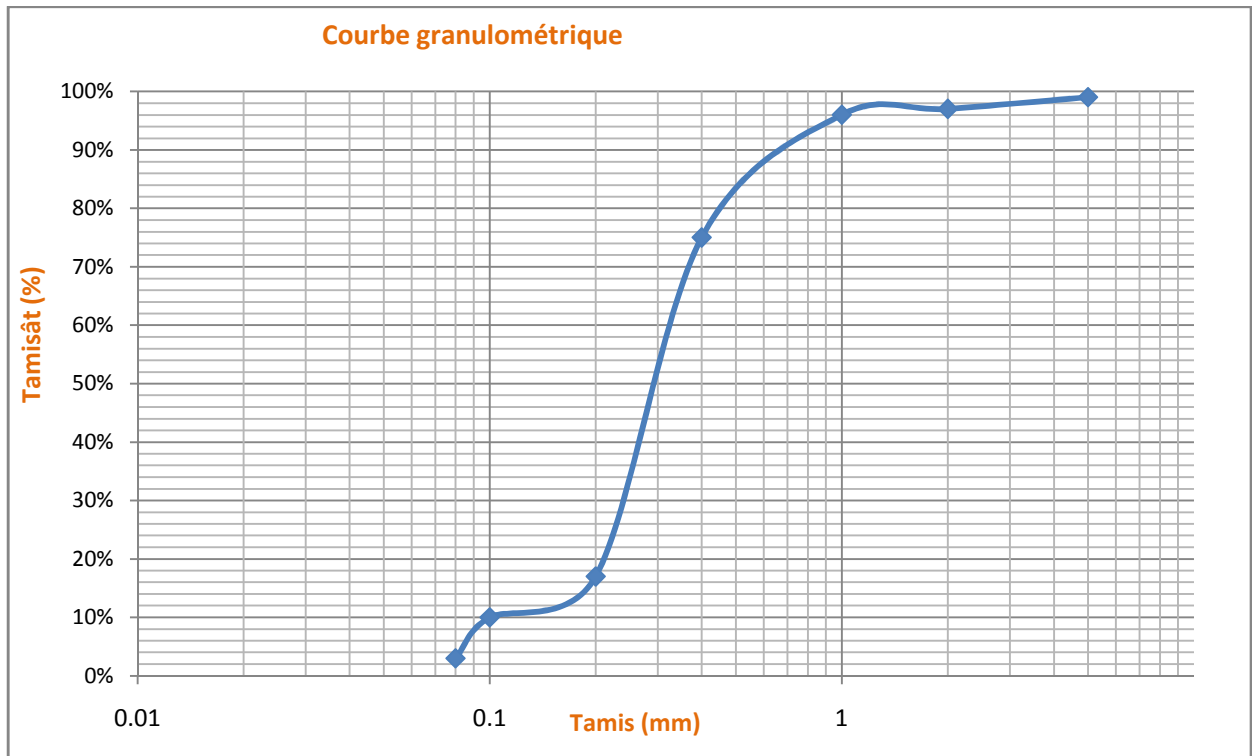


Figure 16 : Courbes granulométrique de l'échantillon 1 à 20 et 60cm

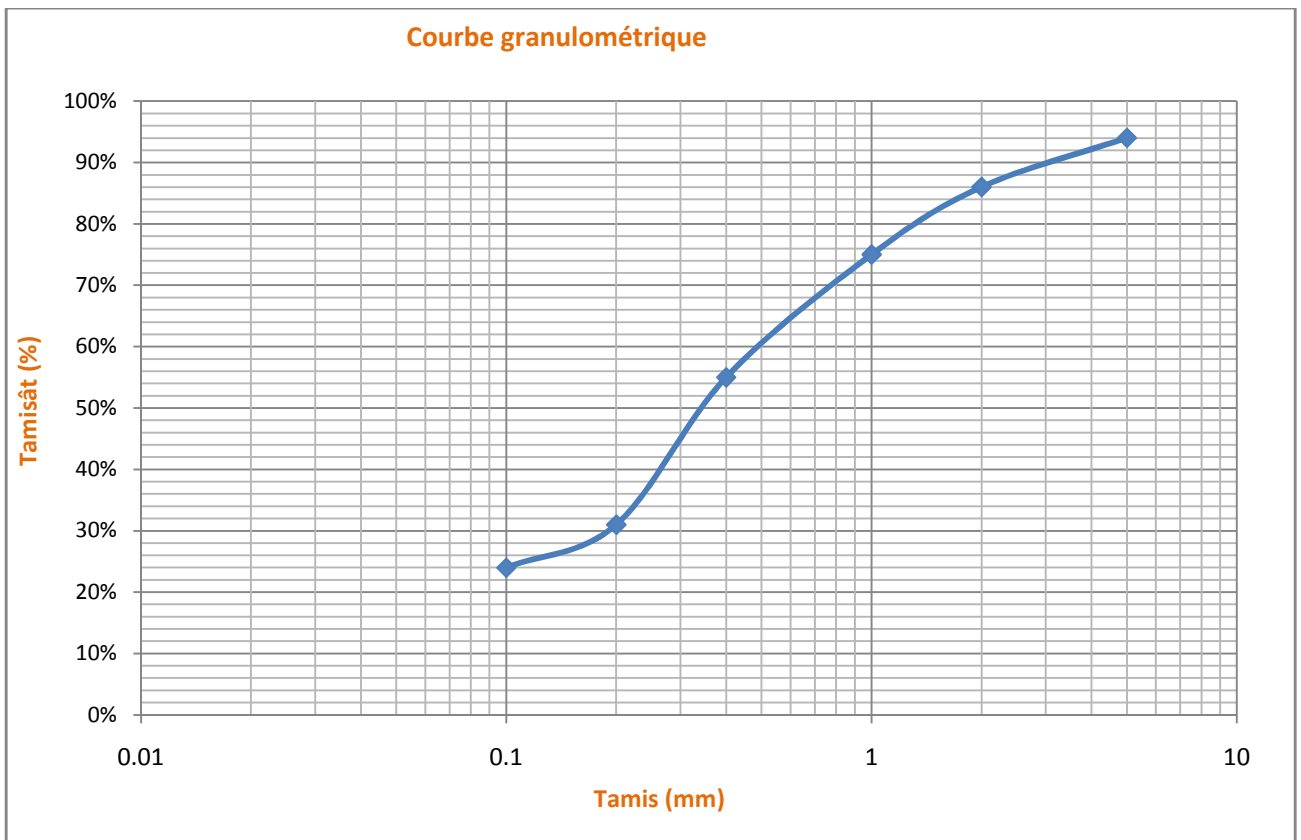
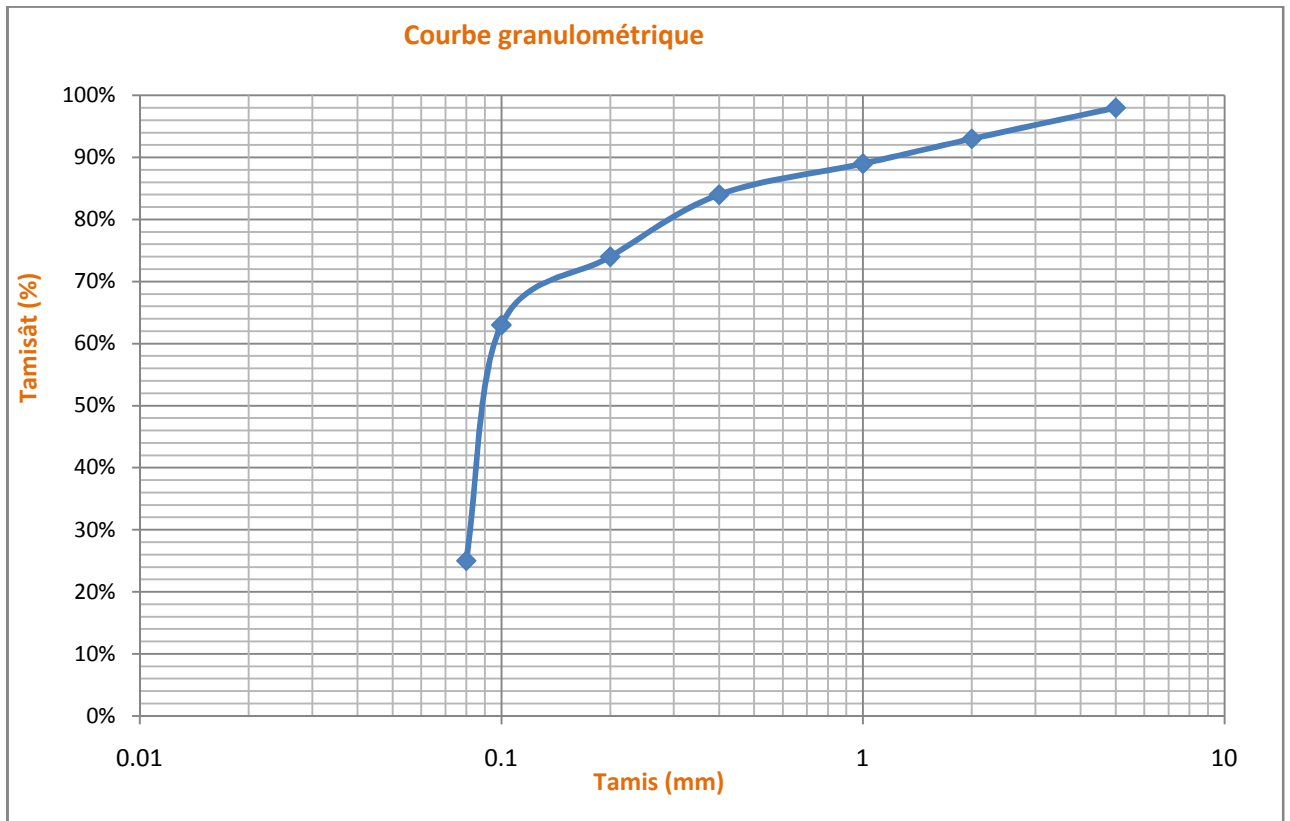


Figure 17 : Courbes granulométrique de l'échantillon 2 à 30 et 60 cm

A partir de ces résultats, on remarque que le sol est occupé par des graviers, des sables moyens et fins.

L'indice DRASTIC calculé (tableau 23) est de 18 pour les sables et 20 pour les graviers. Ce type de sol rend la possibilité de contamination de la nappe très forte. Nous pouvons ainsi conclure que l'aquifère de Tamanrasset est considéré comme très vulnérable à la pollution

Tableau 22 : Poids, Note et indice du paramètre de Type de sol

Classe	Note	Poids	Indice
Sable	9	2	18
Gravier	10	2	20

II.1.5. Topographie : T

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en pourcentage. La pente du terrain influe directement sur le temps de concentration des polluants, elle contrôle certains paramètres tels que le ruissèlement et l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants vers la nappe. En effet, plus la pente des terrains est grande, plus le ruissèlement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible.

Dans la zone d'étude nous pouvons distinguer trois classes dont les indices DRASTIC correspondants sont de 10, 9 et 5 (tableau 24)

Tableau 23 : Poids, Note et indice du paramètre de la Topographie

Classe	Note	Poids	Indice
0-2 %	10	1	10
2-6 %	9	1	9
6-12 %	5	1	5

La carte de vulnérabilité relative à la pente (figure 18) montre trois classes de vulnérabilités : très forte, forte et moyenne. La zone de très faible pente de 0-2 % et de faible pente 2 -6 % représentent les zones les plus vulnérables et couvrent la majeure partie de la zone d'étude. Cette dernière est ainsi caractérisée par de faibles pentes ce qui favorise l'infiltration plutôt que le ruissèlement et donc une éventuelle pollution qui se produit à la surface serait ainsi entraînée vers la nappe

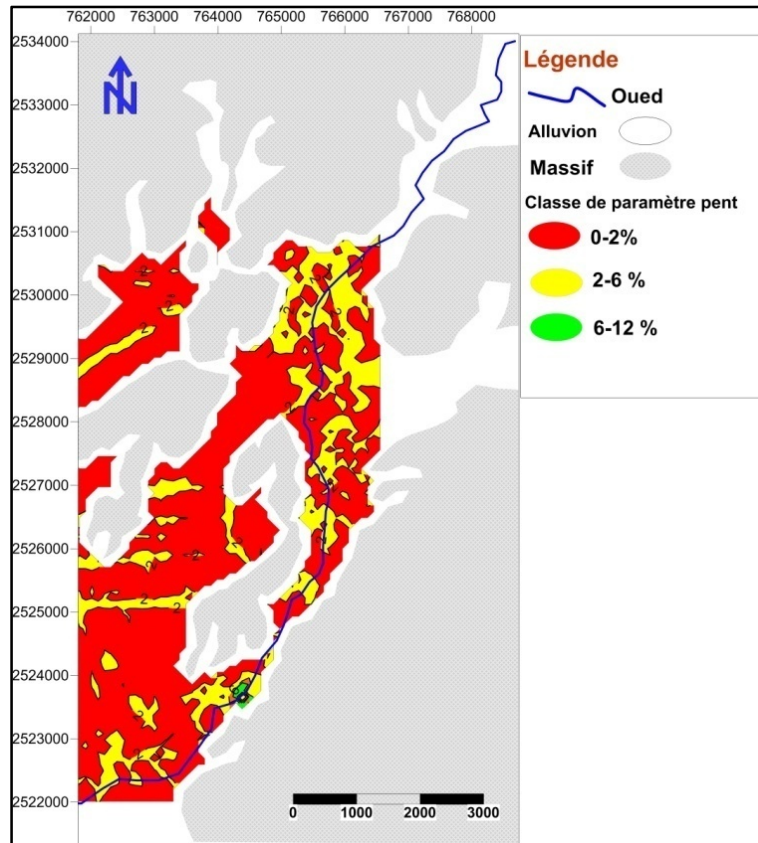


Figure 18 : Carte de la vulnérabilité relative à la topographie

II.1.6.Nature de la zone non saturée : I

La zone non saturée est définie comme la fraction entre la nappe et la surface du sol où les pores sont partiellement saturés en eau. La perméabilité de cette zone non saturée contrôle la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe.

La zone non saturée de l’aquifère constitue souvent le siège des processus de biodégradation, de filtration, de dispersion et d’atténuation du polluant. Ces processus sont d’autant plus importants que l’épaisseur de la zone non saturée est grande et la perméabilité des terrains est faible. Cette perméabilité est étroitement liée à la nature lithologique, à la granulométrie et au degré de fissuration des terrains.

Pour déterminer les caractéristiques de la zone non saturée dans notre région d’étude, on a utilisé la méthode de rehse (1977) qui permet l’estimation du pouvoir épurateur du sol par l’application de la formule suivante :

$$M_d = \sum_{i=1}^n h_i I_i$$

M_d : pouvoir épurateur de la zone de couverture

h_i : épaisseur de chaque sous-couche constituant la zone non saturée

I_i : indice d’épuration défini par Rehse

Si $M_d < 1$ l'épuration est partielle

Si $M_d \geq 1$ l'épuration est totale

Tableau 24 : Indice d'épuration des différents matériaux (REHSE, 1977)

Granulométrie	Matériaux	Indice d'épuration
Roches ayant des propriétés d'adsorption	Humus, 5-10 % humus, 5-10 % argile	0.8
	Argile, limon argileux, sable très argileux, argile limoneuse,	0.5
	Silt argileux à silt, limon fin	0.4
	Silt, sable silteux, sable peu silteux et peu argileux, sable limoneux	0.22-0.33
Roches sableuses	Sable fin à moyen	0.17
	Sable moyen à grossier	0.1
	Sable grossier	0.07
Gravier	Gravier silteux, riche en sable et en argile	0.13
	Gravier peu silteux, beaucoup de sable	0.08
	Gravier fin à moyen riche en sable	0.04
	Gravier moyen à grossier, peu de sable	0.03
	Galets	0.02

Dans la région d'étude à la base des résultats de l'analyse granulométrique combinés aux données des logs de forages, la zone non saturée est composée dans sa majeure partie de sable moyen à grossier. Les notations et pondérations sont mentionnées dans le tableau 26

La zone non saturée a un indice d'épuration inférieur à 1, ce qui indique que cette zone n'assure qu'une épuration partielle de l'aquifère.

Tableau 25 : Poids, Note et indice du paramètre de la nature de la zone non saturé

Classe	Note	Poids	Indice
< 1	10	5	50

II.1.7. Perméabilité : C

C'est l'aptitude d'un aquifère à permettre le mouvement de l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique donné dont la direction diffère généralement de celle de l'écoulement. Ce paramètre est étroitement lié à la granulométrie des formations aquifères. Il joue un rôle très important à la vulnérabilité car il contrôle la vitesse d'écoulement des eaux souterraines dans la zone saturée et de ce fait la vitesse de migration d'un polluant.

Dans la région d'étude la zone saturée est constituée dans sa majeure partie de sables. Ces formations sont caractérisées par une forte perméabilité qui varie entre 10^{-2} à 10^{-4} m/s ce qui reflète une bonne perméabilité qui facilite la propagation du polluant. Les indices DRASTIC calculés (Tableau .27) sont de 24 et 30. D'après ce paramètre l'aquifère est considéré comme très vulnérable

Tableau 26 : Poids, Note et indice du paramètre de la perméabilité

Classe	Note	Poids	Indice
➤ $9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	10	3	30
$4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	8	3	24

II.1.8. Carte de vulnérabilité :

La superposition de ces cartes permet d'établir la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tamanrasset. A l'aide du calcul de l'indice de vulnérabilité (ID) qui est le résultat de la somme des produits entre les notes et poids de chaque paramètre :

$$ID_f = (\text{Notes} * \text{Poids})$$

Dans notre cas on a utilisé quatre paramètres qui sont la profondeur de la nappe, la topographie la recharge et la nature de la zone non saturée pour calculer l'indice DRASTIC.

Nous avons retenu deux classes de vulnérabilité :

- < 80 —→ Très faible
- $80-120$ —→ Faible

La carte finale montre qu'il ya deux classes de vulnérabilité : la classe de faible vulnérabilité occupent le Nord, le centre et le Sud de la zone d'étude. Cette classe peut être expliquée par la profondeur de la nappe et la faible recharge. La classe de très faible vulnérabilité est localisée au centre et s'étend au Sud de la zone.

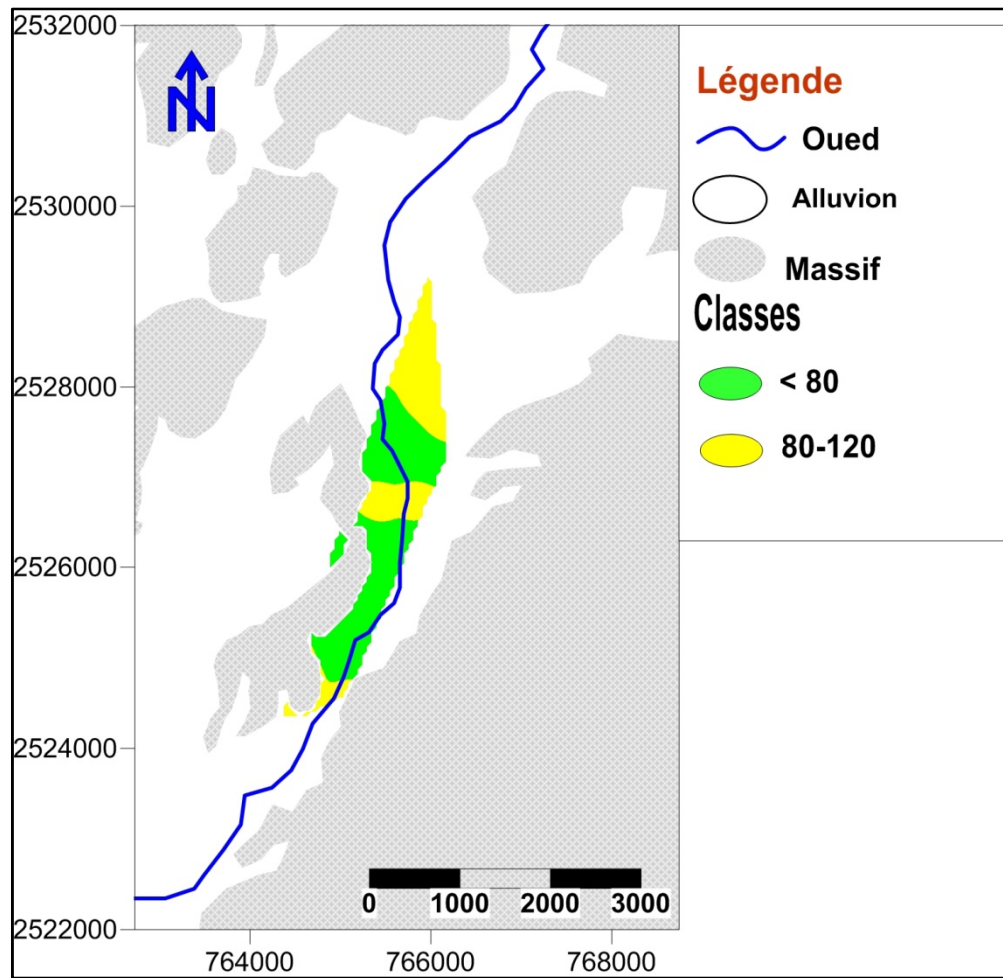


Figure 19 : carte de vulnérabilité DRASTIC

II.2.Méthode GOD :

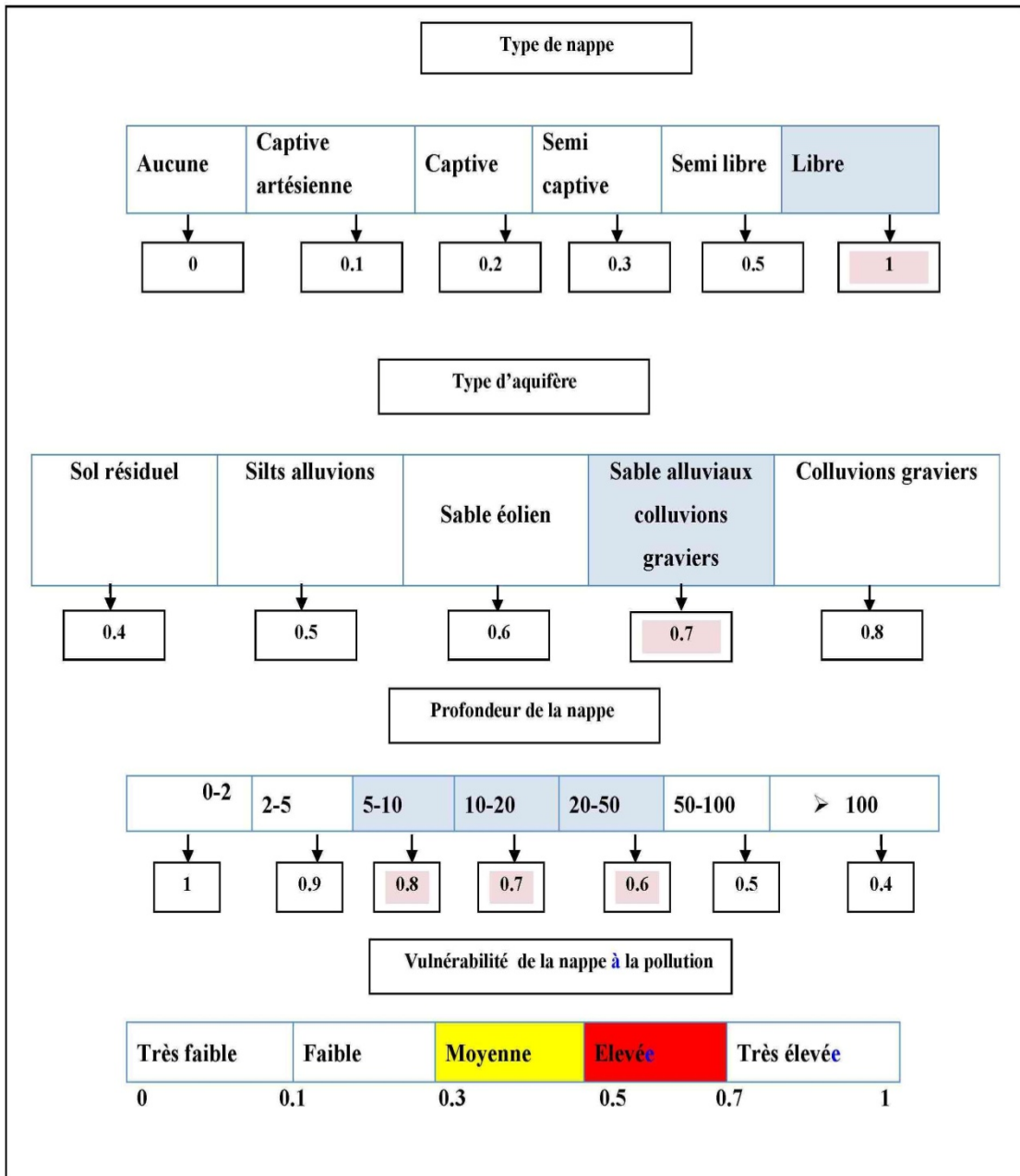


Figure 20 : Vulnérabilité de la nappe d'inféro-flux de Tamanrasset par la méthode GOD

II.2.1.Carte de profondeur D :

La carte réalisée (figure 21) montre qu'il ya 3 zones de vulnérabilité, la majeure partie de la zone est de 10-20 m de profondeur c'est la zone à moyenne vulnérabilité. La zone de vulnérabilité faible entre 20 et 50m de profondeur est dans la partie sud de la zone d'étude

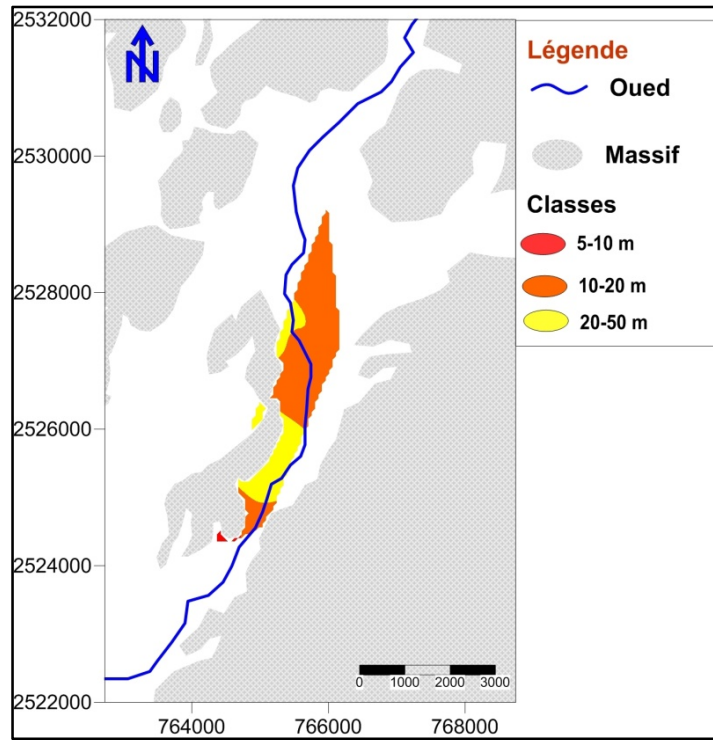


Figure 21: carte de profondeur GOD

II.2.2. Carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD :

Les indices calculés ont permis de tracer la carte de vulnérabilité (figure 22). L’observation de cette dernière montre deux zones avec des classes de vulnérabilité différentes. Une zone de moyenne vulnérabilité située au centre et occupe la grande partie de la zone d’étude, elle est caractérisée par une faible profondeur de la nappe et par des formations à dominance sableuses perméables. La classe de vulnérabilité forte est située au Nord, à l’Est et au Sud de la zone.

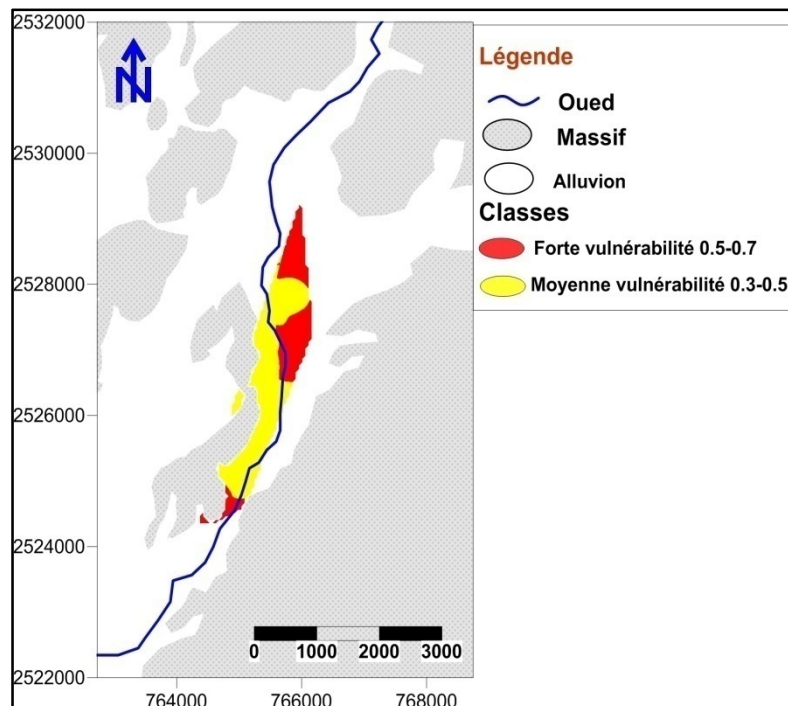


Figure 22 : Carte de vulnérabilité GOD

III. Conclusion

L'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution a permis l'établissement de deux cartes de vulnérabilité à partir de l'application de deux méthodes (GOD, DRASTIC).

L'observation de la carte relative à la méthode GOD montre deux zones avec des classes de vulnérabilité différentes : une zone à moyenne vulnérabilité située au centre et occupe une grande partie de la zone d'étude caractérisée par une faible profondeur de la nappe et par des formations à dominance sableuses perméables. Une zone à vulnérabilité forte observée au Nord à l'Est et au Sud de la zone

La carte relative à la méthode DRASTIC montre qu'il ya deux classes de vulnérabilité, la zone de faible vulnérabilité occupe le Nord de la section d'étude, et la zone de très faible vulnérabilité située au centre et s'étend au Sud de la zone.

Conclusion générale

La région de zone d'étude située dans le grand sud algérien (Hoggar centrale), s'étend sur une superficie totale de 2600 Km².

L'évolution démographique de la ville de Tamanrasset a connu un accroissement progressif et a atteint environ 176637 habitants en 2008.

L'étude géologique montre que la majeure partie de la région est occupée par des formations gneissiques paleoprotozoïques, recoupées par du granite panafricain et des épanchements basaltiques plio-quaternaires et des alluvions qui recouvrent le lit de l'oued Tamanrasset.

La région fait partie des zones arides où les conditions climatiques sont difficiles. L'étude climatique a permis de déterminer le climat de la région. C'est un climat hyper aride caractérisé par une température moyenne annuelle de 22.48°C. La lame d'eau précipitée enregistrée est de 52.72mm tandis que l'évaporation mesurée au niveau de la station de Tamanrasset est de 4911mm.

L'étude hydrogéologique montre 3 niveaux superposés : Les alluvions superficielles (nappes d'inféoflux), couche altérée et l'aquifère de socle

Les cartes piézométriques montrent que le sens d'écoulement de la nappe est de Nord-Est vers le Sud-Ouest. Le gradient hydraulique est faible dans toute la zone d'étude. Ceci permet de conclure que la diffusion d'un éventuel polluant serait facile dans la plupart de la zone d'étude.

L'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution a permis l'établissement de deux cartes de vulnérabilité à partir de l'application de deux méthodes (GOD, DRASTIC).

L'observation de la carte relative à la méthode GOD montre deux classes de vulnérabilité : une classe de moyenne vulnérabilité située au centre et occupe la majeure partie de la zone d'étude. Elle est caractérisée par une faible profondeur de la nappe et par des formations à dominance sableuses perméables. Une classe à vulnérabilité forte observée au Nord à l'Est et au Sud de la zone

La carte relative à la méthode DRASTIC montre qu'il y a deux classes de vulnérabilité, la classe de faible vulnérabilité occupe le Nord et la classe de très faible vulnérabilité située au centre et s'étend au Sud de la zone.

Référence bibliographique

Albinet M., (1989) : Pollution des eaux souterraines. BRGM. Service d'hydrogéologie.

Aller L, B. et al (1987): DRASTIC a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600/2-878-036

Bentekhici, N .2015. ne de Sidi Bel. Article, Agence Spatiale Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la plai Algérienne Centre des Techniques Spatiales, 14p.

Bitat.B. 2013. L'eau a Tamanrasset : gestion d'une pénurie. Mémoire de magister, université de Constantine, 248p.

BOULAHBAL, S.2011.Etude des écoulements souterrains dans les gneiss schisteux fissurés du précambrien de la région de Tamanrasset. Mémoire de magister, université de Hadj Lakhdar, Batna, 196p.

Cosandey C. et Robinson, M., 2001. Hydrologie Continentale. Armand Colin, 359 p., Paris.

Edilasio,M . Paulo Jorge da Costa, P. 2015.Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du Bas Cheliff .Mémoire de Master, Université Djilali BOUNAAMA de Khemis Miliana, 54p
Gogu R.C. & Dassargues A. (2000): Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology, 39 (6), 549-559.

Foster S.S.D & Hirata R. (1988): Groundwater risk assessment: a methodology using available data. CEPIS Technical Report, Lima

Gogu R.C. & Dassargues A. (2000): Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology, 39 (6), 549-559.

Haertle´ T. (1983): Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. Groundwater in water resources planning. IAHS 142. SI : IAHS,

Hamza.M, Added.A, Francès.F, Rodriguez.R, Ajmi.A, Abdeljaoued.S, 2008. Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe cotière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Rafraf (Nord-Est Tunisien). Revue des sciences de l'eau Volume 21, numéro 1, p. 1-98

Hanni.I .2018. Effets des barrages d'inféro-flux d'oueds de la région de Tamanrasset sur l'hydrodynamique des nappes alluviales. Mémoire de magister, université d'Oran, 138p.

J .Dubief.(1953). Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara, Alger, 457p.

Jocelyne,V-J.1988. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions et conception assistée par ordinateur. Projet, 25p.

Landreau A. (1996) : Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines, Rapport BRGM R38846, 28 p.

Margane A. (2003): Guideline for groundwater vulnerability mapping and risk assessment for the susceptibility of groundwater resources to contamination. Technical Cooperation Project N°1996.2189.7. "Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region". Technical Reports Vol. 4. Damascus (Syria) : BGR ; ACSAD,

Meriem .D.E, Boufassa. A : le Hoggar, office national de la recherche géologique et minière (O.R.G.M), (bureau de prospective des ressources minérales (B.P.R.M)).

Seiler, K.-P. and Lindner, W. 1995. Near Surface and Deep Groundwater. Jour. Hydrol. 165, 33–44. Shiklomanov, I.A. 1999. World Water Resources. Modern Assessment and Outlook for the 21th Century, UNESCO, Paris, 50 pp.

SCHNEBELENN.et al (2002) : Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine -Année 5. Etude Sectorielle ~ Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions Rapport BRGM/RP-51178FR, 75p.

Taringa, L .Hadj-Said, S .Zeddouri, A .Ben El Kheir, A and Taupin, J-D. La nappe alluviale une ressource vulnérable en zone aride. Conférence Internationale sur l'Hydrologie des Grands Bassins Fluviaux de l'Afrique, Hammamet-Tunisie de 26-30 Octobre 2015.

Zaporozec A. & Vrba J. (1994b). Classification and review of groundwater vulnerability maps. In Vrba J. et ZaporozecA. (Ed.), Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, 16, 21-29.