



Gestion quantitative et qualitative des ressources en eau dans la plaine alluviale de Karfiguéla à l'aide d'un SIG : Etude de la recharge induite de la nappe et sa vulnérabilité à la pollution

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE EN EAU ET ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES/
AEP-EAUX SOUTERRAINES

Présenté et soutenu publiquement le 11 Novembre 2016 par

Aly SIMBORO

Directeur de mémoire : **Dr. Harouna KARAMBIRI, Maître de conférences CAMES**
Encadreur : **Dr. Mahamadou KOITA, Maître Assistant CAMES**

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Maître de stage : **M. Yembi Nestor Fiacre COMPAORE**

jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Hamma YACOUBA

Membres et correcteurs : Dr. Harouna KARAMBIRI
Dr Justine TIROGO
Mr Moussa FAYE
Dr Mahamadou KOITA

Promotion

[2014/2015]

DEDICACES

*LOUANGE À ALLAH SEIGNEUR DE L'UNIVERS, À QUI JE RENDS GRÂCE
POUR TOUS SES BIENFAITS*

Je dédie ce mémoire ... ✍

- ✚ A mon père **SIMBORO Seydou**, merci pour l'éducation que tu m'as donnée.

- ✚ A (Feue) ma maman **SIMBORO née DIARRA Assétou**, pour l'amour offert, tu resteras à jamais dans nos cœurs, qu'Allah le tout puissant dans sa miséricorde t'agrée dans son paradis. Amina !

- ✚ A mes sœurs **SIMBORO Kadija, Amal et Hadja Safiat**, merci pour votre soutien, pour vous j'irai de l'avant.

- ✚ A ma tante **OUADRAOGO née KABORE Salimata** pour son assistance

- ✚ A toutes mes familles paternelles et maternelles et aux amis qui m'ont soutenu toujours.

REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, je voudrais exprimer ma profonde gratitude à tous ceux dont la disponibilité, le soutien et la contribution à divers niveaux m'ont aidé à la conception et à la réalisation de ce document. Ce sont :

- Dr. Harouna KARAMBIRI, le directeur du présent mémoire pour ses conseils et orientations.
- Dr. Mahamadou KOITA, Enseignant chercheur au Laboratoire LEAH à 2iE qui est mon encadreur interne. Merci pour les conseils et suggestions qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire.
- Monsieur Yembi Nestor Fiacre COMPAORE, Assistant Technique du Projet PADI-BF 101 ; pour avoir supervisé ce travail en tant que maître de stage et dont la disponibilité et les critiques pertinentes m'ont permis de mieux orienter cette étude.
- Messieurs Ahmed KAM, Yacouba FOFANA pour leur disponibilité, leur expérience des SIG m'a été d'une grande aide.
- Mes camarades stagiaires Gédéon N'GUERABE, Ismaël SETGO (étudiants du 2iE) TONDE Aboubacar et COULIBALY (étudiants de l'ENI de Bamako) pour leur collaboration durant nos stages menés conjointement.
- Au programme USAID WA-WASH pour avoir financé ma formation de master 2.

Enfin, que tous ceux qui de près ou de loin ont contribué d'une façon ou d'une autre à l'élaboration de ce mémoire, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

La présente étude a été menée sur la nappe alluviale de Karfiguéla dans la province de la Comoé, région des Cascades du Burkina Faso. Cette nappe est de plus en plus sollicitée pour les besoins de l'agriculture irriguée. Notre travail a pour objectif principal de proposer une gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines dans la plaine.

Ainsi grâce à ArcGIS, qui est un outil de SIG, nous avons caractérisé la recharge induite et évalué la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle.

La superposition des cartes de facteurs influençant la recharge induite a permis d'identifier les zones favorables à la recharge induite qui sont généralement localisée par les zones de forte perméabilité du sol.

L'utilisation des méthodes DRASTIC, GOD et SI pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution montre que la nappe de Karfiguéla court un risque élevée de pollution du fait de la nature hydrogéologique de la nappe et aussi de l'importance des activités agricoles sur presque l'ensemble de l'étendue. Ce risque est encore plus élevé dans les zones de fortes perméabilités.

Les zones de recharge induite sont celles qui présentent un risque très élevé de pollution.

La réalisation d'infrastructures telles que des bassins de rétention et d'infiltration permettrait d'augmenter la quantité d'eau rechargeant la nappe. Aussi une délimitation de périmètres de protection autour de ces zones contrôlant les activités agricoles permettrait d'assurer une qualité acceptable de l'eau.

Mots Clés :

1 - Plaine alluviale de Karfiguéla

2 – SIG

3 – Vulnérabilité à la pollution

4 –Recharge induite

5 – Gestion des eaux souterraines

ABSTRACT

This study was conducted on the alluvial plain Karfiguella in the province of Comoé, Cascades region of Burkina Faso. The aquifer of this plain is increasingly sought for the needs of irrigated agriculture. The main objective of our work is to provide a quantitative and qualitative management of groundwater resources in the plain. Thus through ArcGIS, a GIS tool, we characterized the induced recharge and assessed the vulnerability to pollution of superficial aquifer. The superposition of the factors influencing the induced recharge enabled to identify the suitable areas for induced recharge which are generally shown by the high permeability soil regions.

The use of methods DRASTIC, GOD and SI for mapping vulnerability to pollution shows that Karfiguella's aquifer presents a high risk of pollution because of the hydrogeological nature of aquifer and the importance of agricultural activities almost the whole of the plain. This risk is even higher in areas of high permeability. Induced recharge areas are those with a high risk of pollution. The construction of infrastructures such as retention basins and infiltration would increase the amount of water recharging aquifer. Also a protective perimeter around these areas delimitation controlling agricultural activities would ensure an acceptable quality of water.

Key words:

-
- 1 – Alluvial plain of Karfiguéla**
 - 2 - GIS**
 - 3 –Induced recharge**
 - 4 - Vulnerability**
 - 5 – Groundwater Management**

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'ingénierie de l'eau et de l'Environnement

APEFE : Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger

CSLP : Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté

DGH : Direction Générale de l'Hydraulique

ENI : Ecole Nationale d'Ingénierie de Bamako

IGB : Institut Géographique du Burkina

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

MAHRH : Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques

PADI : Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation

SDR : Stratégie de Développement Rural

SIG : Système d'information Géographique

SNDDAI : Stratégie Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée

SNSA : Stratégie Nationale de Sécurité Alimentaire

WBI : Wallonie-Bruxelles International.

SOMMAIRE

DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ABREVIATIONS	vi
SOMMAIRE	7
LISTE DES TABLEAUX	9
LISTE DES FIGURES	10
AVANT-PROPOS	11
INTRODUCTION	12
I. GENERALITE SUR LA ZONE D'ETUDE	13
I.1. Notion de plaine alluviale	13
I.2. Situation géographique	14
I.3. Climat et végétation	15
I.4. Hydrographie	16
I.5. Contexte géologique et hydrogéologique	17
I.6. Géologie et hydrogéologie	18
I.7. Contexte socioéconomique	20
II. METHODOLOGIE	21
II.1. Données et matériels	21
II.1.1. Données.....	21
II.1.2. Matériels.....	21
II.2. SIG et leur apport	21
II.3. Etude de la recharge induite de l'aquifère alluvial de Karfiguéla	22
II.3.1. Notion de recharge induite	22
II.3.2. Facteur de la recharge induite	23
II.3.3. Cartographie des zones de recharge induite	25

II.4. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution.....	26
II.4.1. Notion de vulnérabilité à la pollution.....	26
II.4.2. Evaluation des paramètres de vulnérabilité.....	26
II.4.3. Méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution.....	28
II.4.4. Etude comparative des méthodes.....	37
II.4.5. Etude du risque de pollution.....	38
III. ANALYSES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS.....	38
III.1. Étude de la recharge induite.....	38
III.1.1. Analyse des facteurs de recharge sur la plaine de Karfiguéla.....	38
III.1.2. Indentification des zones de recharge induite.....	41
III.2. Évaluation de la vulnérabilité sur la plaine.....	43
III.2.1. Analyse des paramètres et cartographie thématique.....	43
III.2.2. Caractérisation de la vulnérabilité à la pollution dans la plaine alluviale de Karfiguéla.....	52
III.2.3. Analyse comparative des résultats:.....	59
III.2.4. Etude du risque de pollution.....	60
IV. DISCUSSIONS.....	62
V. CONCLUSION.....	64
VI. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES.....	66
BIBLIOGRAPHIE.....	68
ANNEXES.....	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau de perméabilités des sols à complété.....	24
Tableau 2 : Cotes et Poids DRASTIC des paramètres de la vulnérabilité	31
Tableau 3 : Classification des indices de vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987)	31
Tableau 4 : Poids GOD des paramètres de la vulnérabilité.....	33
Tableau 5 : Classification des indices de vulnérabilité GOD (Murat et al., 2003)	33
Tableau 6 : Poids et Cotes SI des paramètres de vulnérabilité.....	36
Tableau 7 : Classification des indices de vulnérabilité SI (Ribeiro,2000).....	36
Tableau 8 : Indices et Classe de la vulnérabilité	37
Tableau 9 : Classification du degré de Risque (SMIDA, 2008).....	38
Tableau 10 : Pourcentage des surfaces en fonction des degrés d'infiltration	42
Tableau 11 : Cotes attribuées pour la profondeur de la nappe	44
Tableau 12 : Cotes attribuées pour la recharge	45
Tableau 13 : Cotes attribuées pour l'aquifère	46
Tableau 14 : Cotes attribuées pour le type de sol.....	47
Tableau 15 : Cotes attribuées pour la pente	48
Tableau 16 : Cotes attribuées pour la zone non saturée	49
Tableau 17 : Cotes attribuées pour la conductivité hydraulique	50
Tableau 18 : Cotes attribuées pour l'occupation des sols	51
Tableau 19 : Pourcentage des surfaces selon le degré de vulnérabilité	59
Tableau 20 : Pourcentage des surfaces selon la différence d'indice	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma d'une plaine alluviale type avec ses différentes unités	14
Figure 2: Carte de localisation de la plaine alluviale de Karfiguéla	15
Figure 3: Variation des pluies pour l'année 2014	16
Figure 4: Carte de l'hydrographie de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	17
Figure 5: Géologie du site d'étude (SIG VREO, 2008 ; SIG PADI BF_101, 2013).....	19
Figure 6: Organigramme des étapes de réalisation de la carte de la recharge induite	25
Figure 7: Organigramme de la cartographie de vulnérabilité par la méthode DRASTIC.....	32
Figure 8: Organigramme de la cartographie de vulnérabilité à partir de la méthode GOD	34
Figure 9: Organigramme de la cartographie de la vulnérabilité à partir de la Méthode SI	36
Figure 10 : Carte des pentes de la plaine alluviale de Karfiguéla	39
Figure 11 : Carte de la perméabilité de surface de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	40
Figure 12: Carte piézométrique 3D dans la plaine alluviale de Karfiguéla (2014).....	41
Figure 13 : Carte des zones de recharge induite de la plaine alluviale de Karfiguéla	42
Figure 14 : Carte de profondeur de la nappe de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	44
Figure 15 : Carte de la recharge de la plaine alluviale de Karfiguéla	45
Figure 16 : Carte de la lithologie de l'aquifère de la plaine alluviale de Karfiguéla	46
Figure 17 : Carte des sols de la plaine alluviale de Karfiguéla	48
Figure 18 : Carte de la zone non saturée de la plaine alluviale de Karfiguéla	49
Figure 19 : Carte de la conductivité hydraulique de la plaine alluviale de Karfiguéla	50
Figure 20 : Carte de l'occupation des sols de la plaine alluviale de Karfiguéla	52
Figure 21 : Carte des indices DRASTIC de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	53
Figure 22 : Carte de vulnérabilité DRASTIC de la plaine alluviale de Karfiguéla	54
Figure 23 : Carte des indices GOD de la plaine alluviale de Karfiguéla	55
Figure 24 : Carte de vulnérabilité GOD de la plaine alluviale de Karfiguéla	56
Figure 25 : Carte des indices SI de la plaine alluviale de Karfiguéla	57
Figure 26 : Carte de vulnérabilité SI de la plaine alluviale de Karfiguéla	58
Figure 27 : Carte du risque de pollution de la plaine alluviale de Karfiguéla.....	61

AVANT-PROPOS

Le Gouvernement Burkinabé, dans le souci d'atteindre les Objectifs du Millénaire pour le Développement a adopté le CSLP comme cadre de référence de toutes les interventions de l'Etat. Dans le volet « Développement Rural », la Stratégie Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée et la Stratégie de Développement Rural issues du CSLP, se focalisent sur la croissance du secteur agropastoral enfin d'assurer une atteinte réelle et durable à l'autosuffisance alimentaire et nutritionnelle des populations.

La SNDDAI, a pour objectif général de faire jouer à l'irrigation un rôle significatif pour l'accroissement et la sécurisation de la production agricole, l'augmentation de la valeur ajoutée, l'amélioration de l'emploi et des revenus en milieu rural ainsi que la préservation des ressources naturelles et du capital productif.

Ainsi le Ministère en charge de l'Agriculture et de l'Hydraulique du Burkina, l'APEFE et WBI, ont initié le « Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation (PADI) »

Le programme PADI démarré en 2011 prit fin en décembre 2013. Mais au regard des acquis importants enregistrés, l'APEFE et WBI, ont marqué leur accord pour la reconduction du Programme pour une phase de trois ans à partir du début de l'année 2014 (soit de 2014 à 2016) dénommée PADI Phase II.

Le PADI Phase I et le PADI Phase II regroupent quatre projets :

- Le projet PADI-BF101, qui promeut l'agriculture irriguée par les eaux souterraines et qui constitue le cadre pédagogique de ce stage de fin d'études.
- Le projet PADI-BF102, qui promeut l'agriculture irriguée par les eaux de surface.
- Le projet PADI-BF103, qui promeut le développement de l'agriculture irriguée par l'étude des phénomènes d'ensablement des barrages.
- Le projet PADI-BF104, qui promeut l'agriculture irriguée par le renforcement des capacités des ressources humaines.

L'objectif du projet PADI-BF101 est :

- D'améliorer les connaissances sur les potentialités des aquifères superficiels au profit de la petite et moyenne irrigation ;
- D'évaluer l'impact quantitatif et qualitatif de l'agriculture irriguée sur les ressources en eau souterraine ;
- D'identifier les techniques et technologies appropriées de mobilisation des ressources en eaux souterraines

INTRODUCTION

L'eau est une ressource indispensable à la survie de tous les êtres vivants, et à la réalisation de nombreuses activités fondamentales des sociétés humaines : production alimentaire, activités industrielles, production d'hydroélectricité, conservation des écosystèmes, etc. Or toutes ces activités demandent des quantités d'eau de plus en plus grandes.

Bien que l'eau ne soit pas toujours le principal facteur restrictif, elle demeure tout de même un élément déterminant pour stimuler la production agricole. La gestion de l'eau agricole constitue donc un puissant moyen de lutte contre la pauvreté en milieu rural.

Le Burkina Faso est un pays agricole à 80 %, l'agriculture constitue la principale source de revenus pour près de 86 % de la population active, et procure plus de 50 % des recettes totales à l'exportation (source : MAHRH). Cette agriculture représente 64 % de la demande globale en eau au Burkina Faso et une grande partie de cette demande est satisfaite à partir des eaux de surface pourtant menacées par le tarissement rapide en saison sèche (DGH, 2001). Ce facteur amène beaucoup de cultivateurs à se tourner vers les eaux souterraines qui deviennent de plus en plus exploitées. Les plaines les plus irriguées sont localisées dans les régions des Hauts-Bassins, des Cascades et du Centre Ouest. Au niveau de la plaine alluviale de Karfiguéla dans la région des Cascades, la pluviométrie est relativement bonne et les ressources en eau sont facilement mobilisables. Aussi, on assiste à un développement des activités agricoles et l'extension de périmètres irrigués accompagnés par une demande croissante de la nappe. Face à cette situation, un programme pour la gestion durable des ressources en eaux souterraines dans cette zone est devenu indispensable.

C'est dans ce cadre que le Programme PADI, à travers son Projet PADI BF-101, se fondant sur les orientations de la politique nationale de développement durable de l'agriculture irriguée, nous a confié cette étude portant sur la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau souterraine dans la plaine alluviale de Karfiguéla à l'aide d'un SIG.

L'objectif général est d'étudier la recharge induite de la nappe superficielle de Karfiguéla et d'évaluer sa vulnérabilité à la pollution. Plus spécifiquement notre travail consistera à :

- Identifier les zones favorables à la recharge induite
- Evaluer la vulnérabilité et le risque de pollution à travers différentes méthodes de cartographie.
- Proposer un système de gestion durable de la ressource en eau souterraine

I. GENERALITE SUR LA ZONE D'ETUDE

I.1. NOTION DE PLAINE ALLUVIALE

Une plaine alluviale est un espace géographique caractérisé par une surface topographique à faible dénivelé, située en fond de vallée, constituée d'alluvions (galets, graviers, sables, argiles, limons...) déposées lors de crues d'un cours d'eau et assimilable à la zone inondable de celui-ci. (Figure 1) (Ballais et al. 2011b; Lecce et Pavlowsky, 2004; Wyzga, 1999). Ce cours d'eau coule généralement sur ses alluvions (grains fins ou grossiers alternativement déposés ou repris par le courant) qui recouvrent le substratum rocheux formé d'une roche dure ou bien d'une roche plus ou moins tendre (schistes, grés, marnes). Les principales unités hydrogéomorphologiques d'une plaine alluviale sont le lit mineur et le lit majeur.

Le lit mineur (ou lit ordinaire) d'un cours d'eau est l'espace occupé par l'écoulement pour des crues courantes et est constitué d'un ou plusieurs chenaux bien marqués. On y observe parfois des bancs de sable, de gravier ou de galets qui émergent lors de la période des plus basses eaux (étiage).

Le lit majeur d'un cours d'eau est son champ d'inondation ; ces parties extrêmes ne sont mises en eau que pour des crues exceptionnelles. Les vitesses d'écoulement y sont faibles et les particules les plus fines (limons, argiles) se déposent par sédimentation. A l'intérieur du champ d'inondation, des terrasses alluviales forment parfois des niveaux étagés dont la submersion est de moins en moins fréquente lorsqu'on s'élève au-dessus du lit ordinaire. On distingue donc quelquefois un lit majeur ordinaire, encore appelé **lit moyen (ou lit intermédiaire)** par certains auteurs, submergé fréquemment voire annuellement, et un lit majeur exceptionnel, submergé plus rarement, par exemple seulement par des crues décennales ou plus fortes (Cours d'Hydraulique Fluviale, Biaou 2014).

Ainsi, la plaine alluviale est modelée par le passage à répétitions de crues de différentes intensités. La morphologie du lit mineur d'un cours d'eau est, elle, régie par des phénomènes hydrologiques (débits morphogènes parvenus depuis le bassin versant), naturels (variables de contrôle et de réponse) et anthropiques (dérivations, barrages, prélèvements) plus complexes qui remanient fréquemment l'équilibre dynamique de ce cours d'eau.

Par ailleurs, l'aquifère de plaine alluviale, lorsqu'il existe reste la source d'eau souterraine la plus accessible car il fournit des quantités d'eau importantes à faible profondeur. En effet, les matériaux des nappes alluviales, contrairement aux autres aquifères plus profonds, sont faciles à creuser, même avec des moyens rudimentaires (pelle, pioche...). L'eau contenue dans les

aquifères alluviaux et les aquifères souterrains profonds forme dans une région à potentialité aquifère l'ensemble des eaux souterraines que l'on peut exploiter pour des besoins divers (eau de consommation, eau agricole, eau industrielle par exemple).

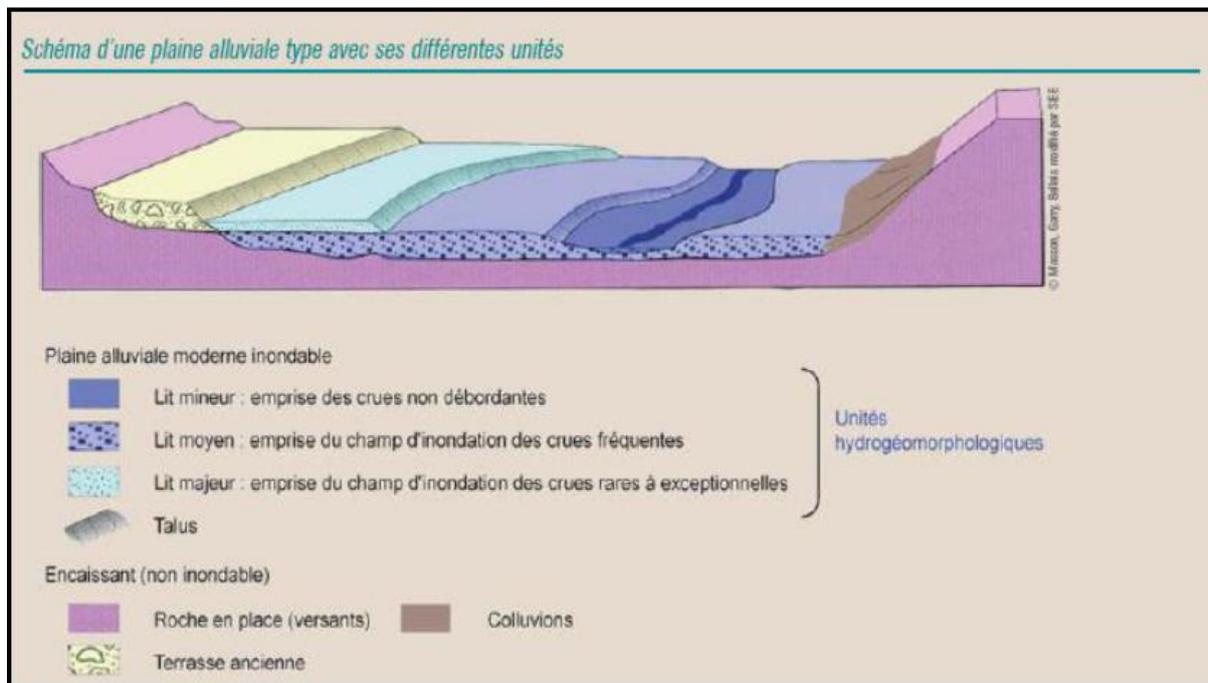


Figure 1: Schéma d'une plaine alluviale type avec ses différentes unités

I.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone d'étude est située dans la région des cascades à l'extrême Sud-ouest du Burkina Faso, à environ 10 km au Nord-Ouest du chef-lieu de la province de la Comoé, Banfora, et est localisée entre les longitudes $4^{\circ}50'0''$ W et $4^{\circ}42'0''$ W et les latitudes $10^{\circ}44'0''$ N et $10^{\circ}28'0''$ N. Elle couvre une superficie de $45,78\text{km}^2$ et s'étend sur 28 km de long (COMPAORE, 2012). En outre la plaine alluviale de Karfiguéla abrite les localités de Karfiguéla, Tengréla, Nafona, Lémouroudougou, Kribina-Lèna, Tiékouna, Niankar, Bounouna, Kossara, Diarabakoko, Sitiéna et Banfora. Elle est accessible à partir de la capitale du Burkina Faso par la route nationale RN^o1 qui relie Ouagadougou à Bobo Dioulasso et par la RN^o2 qui relie Bobo-Dioulasso à Banfora puis par la piste rurale reliant Banfora à Karfiguéla de praticabilité difficile en saison hivernale.

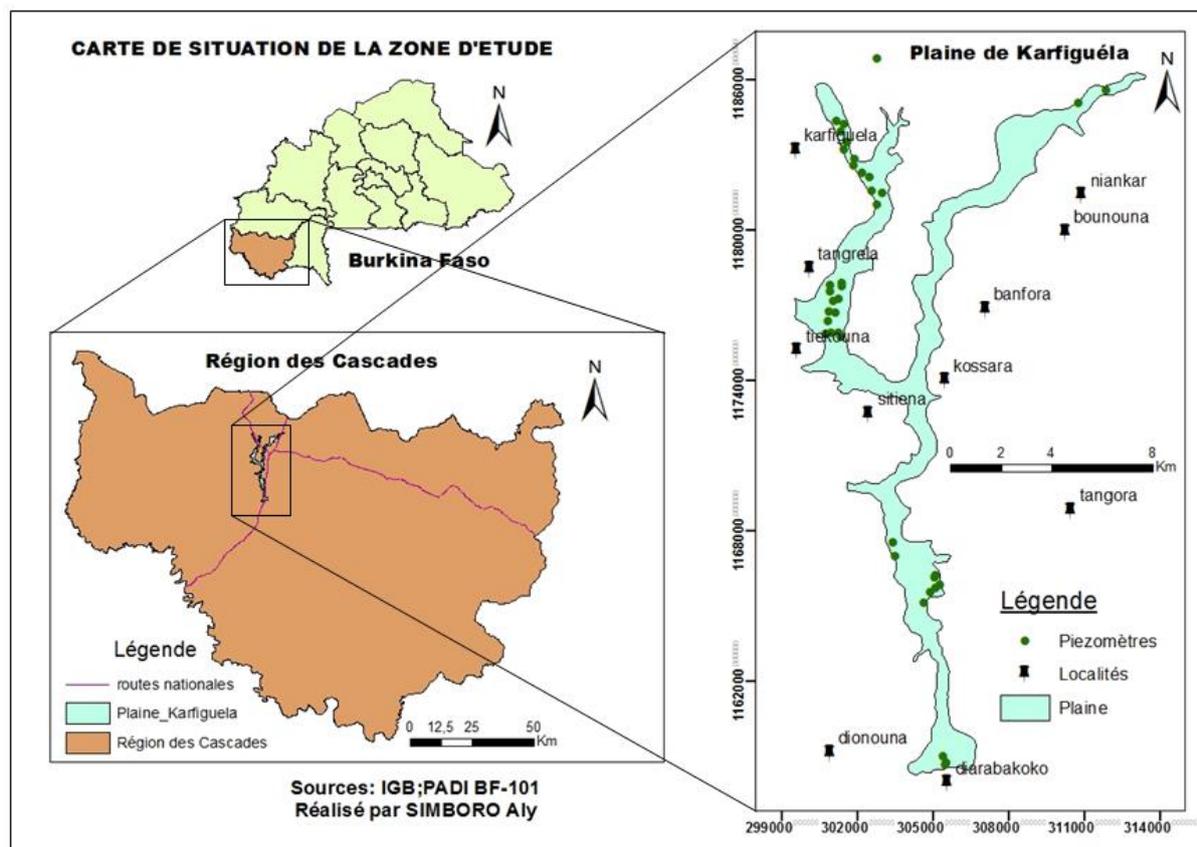


Figure 2: Carte de localisation de la plaine alluviale de Karfiguéla

I.3. CLIMAT ET VEGETATION

La plaine de Karfiguéla appartient au climat tropical de type sud-soudanien. Ce climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons due à l'influence du Front Inter Tropical (FIT): une saison sèche allant de Novembre à Mars et une saison pluvieuse d'Avril à Octobre (Fontès et Guinko, 1995).

La pluviométrie moyenne annuelle des trente-trois dernières années s'élève à 1034,8mm. Pour l'année 2014 la quantité d'eau tombée était de 1125,8 mm répartie en 76 jours. Le mois d'août a été le mois le plus pluvieux avec une hauteur de pluie de 422 mm d'eau (Figure 3).

Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 17°C et 36°C, soit une amplitude thermique de 19° C (GIRE, 2001). L'humidité relative de l'air est variable en saison sèche (20 % à 80 %) tandis qu'en saison des pluies elle peut atteindre une moyenne de 94,04%.

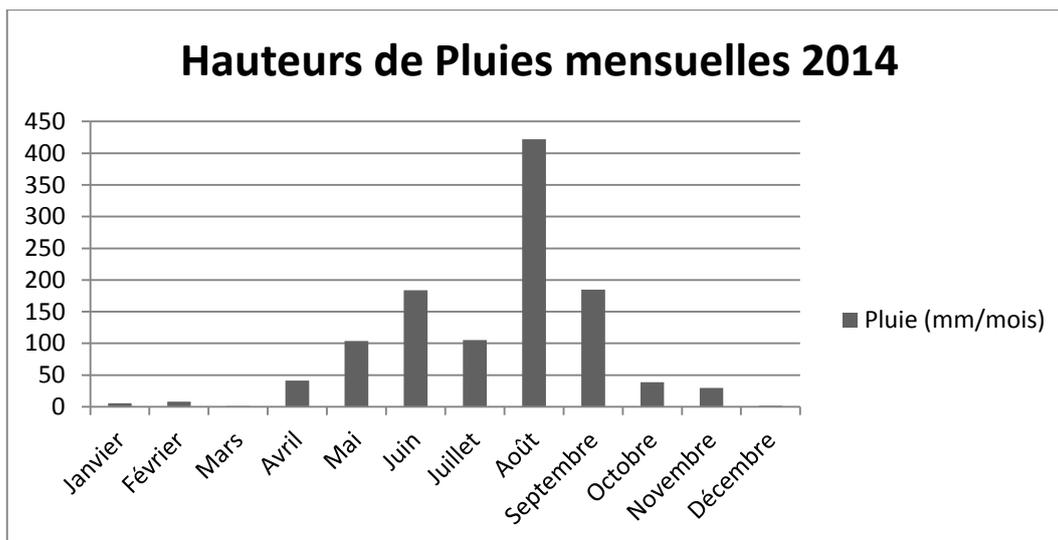


Figure 3: Variation des pluies pour l'année 2014

Ce climat a favorisé le développement d'une végétation de la savane arborée à boisée dans le bassin de la Comoé avec une abondance des espèces ligneuses et les tapis herbacés graminéens. Des forêts classées occupent environ 15,79 % des terres (14 forêts classées) et des formations végétales de type forêts claires et forêts galeries sont rencontrées le long des cours d'eau.

Par ailleurs, on note la présence d'espèces végétales introduites par l'Homme représentées par les peuplements de rôniers, les plantations de *Jatropha curcas*, d'eucalyptus, d'anacardiers, de palmier et les nombreux vergers (bananiers, papayers, manguiers, agrumes...).

I.4. HYDROGRAPHIE

La région des cascades est située dans le bassin versant de la Comoé et dispose de deux fleuves qui coulent de façon permanente :

- **Le fleuve Comoé** : la Comoé est un cours d'eau pérenne qui prend sa source dans la partie septentrionale de la province de la Comoé. Ses principaux affluents sont le Lakoba et le Pa. La plaine alluviale de Karfiguéla constitue le lit majeur de la Comoé sur une longueur de 28 kilomètres environ (COMPAORE, 2012).
- **Le fleuve Léraba** : Il est constitué de deux branches essentielles que sont la Léraba orientale et la Léraba occidentale.

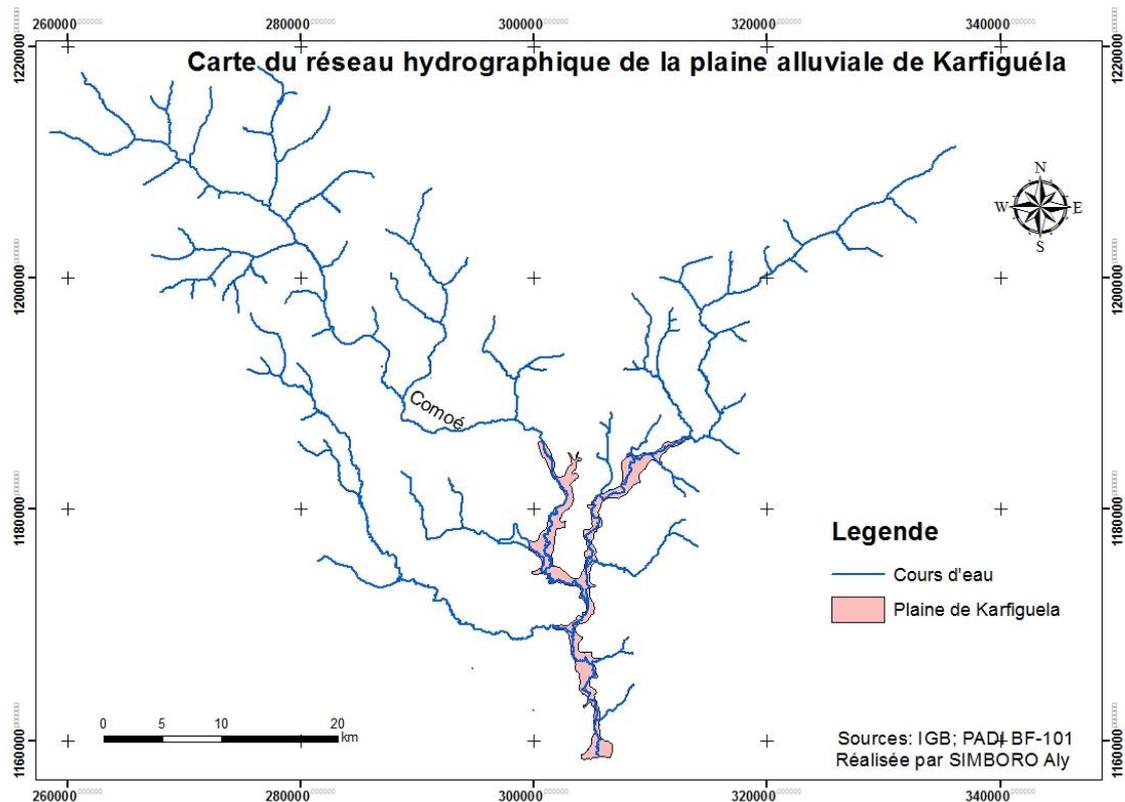


Figure 4: Carte de l'hydrographie de la plaine alluviale de Karfiguéla

I.5. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

➤ Contexte géologique

Le contexte de la région des cascades est globalement caractérisé par deux grandes zones :

- Un socle granitique et métamorphique dans lequel on peut mettre en évidence deux unités géologiques : le précambrien inférieur constitué globalement de granites et de migmatites avec quelques séries gneissiques diversifiées et le précambrien moyen ou birrimien constitué de séries volcaniques et volcano-sédimentaires.
- Une couverture sédimentaire tabulaire qui correspond à la bordure sud-est du vaste synéclyse de Taoudéni centré sur le craton ouest africain. Ces deux formations sont en outre traversées par des sills et des dykes de gabbro et de dolérites.

➤ Contexte hydrogéologique

On distingue au Burkina Faso, le système aquifère de la zone de socle et le système aquifère de la zone du sédimentaire ancien et récent (Continental Terminal).

La région des Cascades, comprend deux entités hydrogéologiques principales:

- Une entité des zones sédimentaires qui est constituée d'une épaisse série de roches qui contient plusieurs niveaux aquifères. Il s'agit d'un bassin sédimentaire essentiellement gréseux d'âge très ancien. Certains niveaux aquifères fournissent des débits très importants de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres cubes par heure (GIRE, 2001).
- Une entité des zones de socle qui est à dominance granitique avec des schistes, des roches vertes et des dolérites. Les débits exploitables sont modestes. Les ressources en eau se situent soit dans la zone altérée et plus ou moins ameublie pour les roches granitiques (arènes), soit dans la roche fracturée (GIRE, 2001).

Par ailleurs des études hydrogéologiques faites par le programme de Valorisation des Ressources en Eau du Sud-Ouest du Burkina Faso (RESO) en 1998 montrent que la répartition des réserves aquifères est très inégale. En effet la zone sédimentaire qui couvre 20% du bassin renferme plus de la moitié des réserves aquifères.

I.6. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE DE LA PLAINE ALLUVIALE

➤ Géologie

La plaine de Karfiguéla est caractérisée par cinq (5) groupes de formation géologique (figure3), ce sont :

Les grès de Kawara Sindou (60 à 350m d'épaisseur) reposent sur le grès inférieur ou directement sur le socle. C'est une formation constituée de grès quartzite très fin à la base et de grès grossier au-dessus (figure 2). Elle est caractérisée par une stratigraphie oblique et la présence d'abondante ride de vague (Hugot, 2002) ;

Les grès inférieurs (50 à 300m d'épaisseur) reposent en discordance sur le socle. La formation est constituée successivement de la base au sommet de grès rouge fin, de grès quartzite fin et de grès rouge à débit schisteux (Hugot, 2002) ;

Les schistes et volcano-sédiments : Ces roches présentent une certaine complexité. En effet, à l'altération, elles peuvent être difficiles à différencier avec les roches andésitiques schisteuses et altérées. Globalement, il s'agit de pélites, de schistes gréseux, de schistes lustrés gris-noir, des schistes tuffacés ainsi que de rares horizons quartzitiques (OUEDRAOGO,2008) ;

Les granodiorites sont des roches grenues, mésocrates à minéraux relativement riches en ferromagnésiens et feldspaths (Hugot, 2002). Elles constituent la majeure partie du socle au niveau de notre site d'étude ;

Le groupe des Tonalites : Il comprend un certain nombre de faciès de composition allant de la granodiorite à la tonalité et la diorite quartzifère. Ces roches sont globalement très voisines. Elles sont de grain moyen à grossier, présentant une fabrique planaire ou une foliation gneissique nette. Localement, un rubanement est associé à la foliation et donne à la roche un aspect de migmatite. Elles sont généralement recoupées par des filons d'aplite ou de pegmatite. Dans ces roches le plagioclase prédomine ; le feldspath potassique, le quartz, l'amphibole et la biotite sont moins abondants (OUEDRAOGO, 2008).

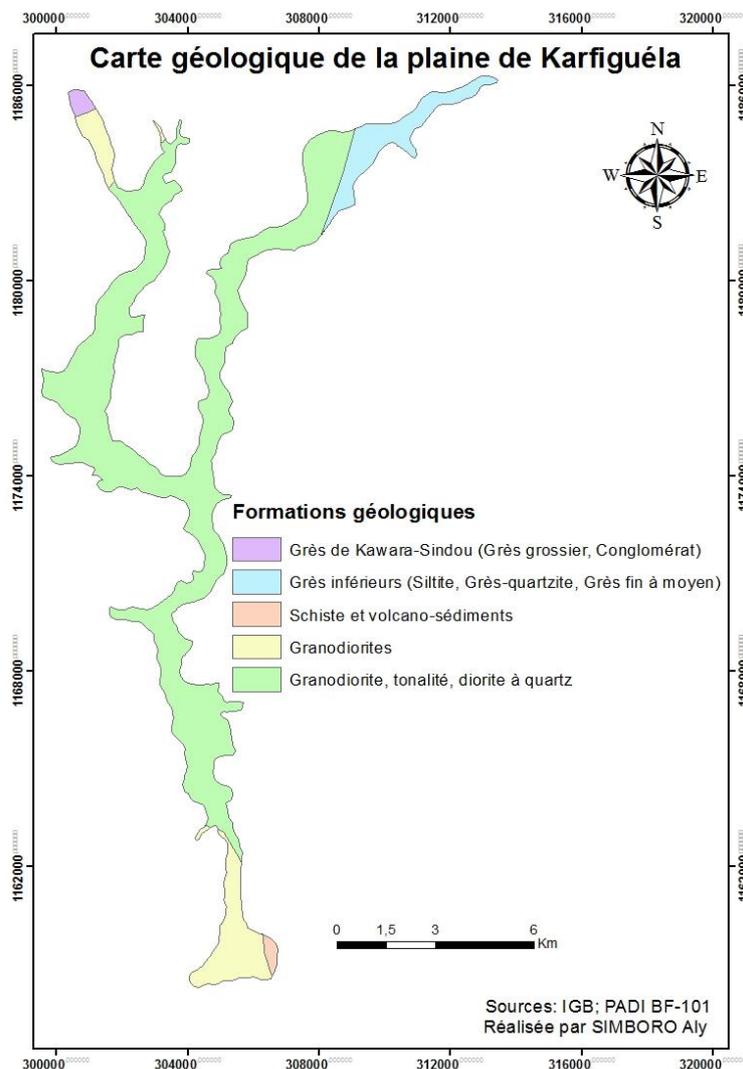


Figure 5: Géologie du site d'étude (SIG VREO, 2008 ; SIG PADI BF_101, 2013)

➤ Hydrogéologie

Les caractéristiques hydrogéologiques du site d'étude sont relativement bien connues. En effet il est doté de nombreux piézomètres et a fait l'objet de plusieurs études.

(HALADOU 2013)

Ainsi à Karfiguéla, la nappe est libre avec une surface piézométrique très proche du sol(en

moins de 10 m).

HALADOU, dans ses travaux, a proposé un modèle conceptuel pour l'aquifère de Karfiguéla composé de 3 couches de haut en bas comme suit:

- Une couche d'alluvions très argileuses avec une épaisseur variant de 20 à 25 mètres
- Une arène de sable et de gravier d'épaisseur relativement faible (environs 10 mètres)
- Une couche d'horizon altéré et fissuré dont la base constitue le toit du socle sain. Son épaisseur moyenne est de 7 m sur granite et de 20 m sur métavolcanite et métasédiment;

I.7. CONTEXTE SOCIOECONOMIQUE

L'agriculture irriguée est l'activité principalement développée sur la plaine de Karfiguéla. Les champs côtoient pratiquement les berges en fragilisant la pérennité du cours d'eau par l'ensablement. Les paysans qui y sont installés pratiquent la culture maraichère composée de légumes (choux, concombre, piment etc.) et de céréales (maïs). Le système d'irrigation utilisé est gravitaire avec des pompes installées directement sur le cours d'eau.

En période d'hivernage, la plaine est inondée et l'agriculture pluviale est pratiquée dans les zones non inondées.

En période sèche les superficies non emblavées de la plaine offrent un pâturage exploité par les éleveurs nomades et sédentaires. Les espèces élevées sont les bovins, les ovins et les caprins.

II. METHODOLOGIE

II.1. DONNEES ET MATERIELS

II.1.1. Données

Dans le cadre de cette étude, plusieurs types de données ont été utilisés. Il s'agit :

- Des données de la piézométrie et la qualité des eaux issues de la campagne de suivi piézométrique et qualité des eaux réalisée par le PADI-BF 101 (2013 - 2015) dans la région.
- Des données de conductivité hydraulique (BETAN, 2013)
- Des coupes lithologiques des piézomètres du PADI- BF 101
- Des données cartographiques : la carte d'occupation du sol, carte hydrographique.

II.1.2. Matériels

Le matériel utilisé est essentiellement composé :

- d'une sonde piézométrique à double signalisation (sonore et lumineux) pour mesurer manuellement le niveau statique.
- d'une sonde Diver: Sonde à capteur de pression qui permet de faire une mesure continue du niveau statique.

Outre le matériel terrain, nous avons utilisé plusieurs logiciels techniques à savoir:

- Microsoft Access pour l'utilisation de la base de données
- Microsoft Excel pour un prétraitement des données
- Surfer 9 pour l'établissement des différentes cartes basées sur la représentation de données spatiales
- ArcGIS 9.2 pour élaborer les différentes cartes thématiques

II.2. SIG ET LEUR APPOINT

Le concept de SIG(Système d'Informations Géographiques) désigne un système de rassemblement, de stockage, de manipulation, d'analyse et d'affichage des données localisées dans l'espace et attributaires d'origines différentes et leur visualisation dans les modèles de décision afin de résoudre les problèmes complexes d'aménagement et de gestion" (ESRI, 2002).

Les SIG permettent d'inspirer des approches globales en matière de gestion des ressources en eaux qui pourraient faciliter le développement de solutions aux problèmes de surexploitation et de dégradation de la qualité des eaux souterraines (Habib Smida et al., 2009).

Le point fort des SIG réside particulièrement dans leur capacité de relier les objets géographiques à leurs attributs thématiques. Cette dernière fonction est très utile en ce qui concerne le calcul et l'établissement des cartes de recharge et de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS 9.2 développé par ESRI. Ce logiciel doté de fonctions et outils mathématiques puissants, permet de travailler en systèmes vectoriels et matriciels.

Les outils les plus utilisés sont le module « interpolate Grid » pour la spatialisation des données ponctuelles, module « Reclassify » pour l'attribution des côtes et le module « Map calculator » pour les opérations de croisement entre les cartes.

II.3. ETUDE DE LA RECHARGE INDUITE DE L'AQUIFERE ALLUVIAL DE KARFIGUELA

II.3.1. Notion de recharge induite

La recharge ou l'alimentation d'une nappe peut être définie comme étant l'apport d'eau externe, de toutes origines, à un aquifère (Ndiaye, 2008). Il existe quatre (4) principaux modes de recharge :

- La recharge naturelle ou directe qui se fait par l'infiltration des précipitations suivie d'une percolation à travers la zone non saturée jusqu'à la nappe.
- La recharge latérale et/ou verticale inter aquifère
- La recharge induite qui se fait à partir des eaux de surface
- La recharge artificielle utilisant les techniques telles que les injections.

Dans le cadre de cette étude nous nous intéresserons à la recharge induite à travers l'identification des zones favorables à cette recharge.

Ces zones pourraient faire l'objet d'aménagement pour accroître la productivité des eaux souterraines dans la plaine alluviale de Karfiguéla.

Une étude menée par CGWB (1994) sur des bassins d'infiltration a montré que si le site d'un réservoir de filtration est correctement choisi et le réservoir conçu de manière appropriée, la recharge des eaux souterraines pouvait augmenter de 70 % (Raju, 1998).

Les critères pour le choix des sites dépendent non seulement des conditions des eaux souterraines, mais aussi de la prédisposition du terrain pour la recharge. Ainsi les paramètres tels que le niveau de la nappe phréatique, les données géologiques (densité et couverture du sol), données hydrogéomorphologiques (densité de drainage, pente, relief) jouent un rôle important dans le choix du site.

II.3.2. Facteur de la recharge induite

- **Géomorphologie : topographie**

La détermination de la forme des reliefs est très utile pour déterminer le sens d'écoulement des eaux de surface (les zones hautes et les zones basses) et pour rechercher des sites de réservoirs de rétention et de stockage des eaux de surface. La topographie à travers la pente a un contrôle direct sur le ruissellement et l'infiltration des eaux. Les zones basses à faible pente permettent une accumulation des eaux de surfaces et leur infiltration jusqu'à la nappe.

- **Hydrographie**

Il s'agit tout d'abord d'analyser toutes les sources en eau possibles pour la recharge et de définir leur répartition en débit dans le temps et dans l'espace ainsi que le meilleur moyen de les diriger efficacement sur le site ; par conséquent, s'assurer de disponibilités adéquates en quantité et qualité au moment voulu. Un projet de recharge comprendra donc une étude des ressources en eau de surface locales et appréciera les possibilités d'importation. En effet, s'il est souhaitable que les eaux de recharge proviennent de cours d'eau proches du site, il n'est pas à exclure d'utiliser les ressources d'un bassin excédentaire. Ainsi la densité de drainage, le débit et la pérennité du cours d'eau interviennent dans la quantité et la continuité de la recharge durant toute l'année.

- **Sol : perméabilité**

Les caractéristiques des dépôts de surface sont à considérer. Par exemple, plus la texture du sol sera grossière plus le taux d'infiltration sera élevé. Outre la texture, intervient le paramètre perméabilité. Une carte de perméabilité a été élaborée à partir de la carte des sols en attribuant un coefficient de perméabilité (tableau 1) pour chaque type de sol en zone semi-aride. Elle permet de visualiser les zones de forte perméabilité qui sont les plus favorables à l'infiltration des eaux de surface et donc à l'alimentation des nappes.

Type lithologique	Perméabilité (cm/s)
Gravier	$10^{-1} < k < 10^2$
Sable	$10^{-3} < k < 10^{-1}$
Limon et sable argileux	$10^{-7} < k < 10^{-3}$
Argile	$10^{-11} < k < 10^{-8}$
Roches non fissurées	$10^{-10} < k < 10^{-8}$
Dépôts grossiers	$10^1 < k < 10^2$
Graviers fins	$10^{-1} < k < 10^1$
Grès	$10^{-3} < k < 10^{-1}$
Calcaires	$10^{-5} < k < 10^{-3}$
Grès + marnes + calcaires	$10^{-7} < k < 10^{-5}$
Marnes + calcaires	$10^{-9} < k < 10^{-7}$
Marnes, gypses, sol de <i>sebkha</i>	$k < 10^{-9}$

Tableau 1 : Tableau de perméabilités des sols SMIDA, 2006

- **La piézométrie**

Le niveau piézométrique peut être défini comme étant le niveau de la colonne d'eau qui équilibre la pression hydrostatique régnant au bas de cette même colonne. En pratique, elle représente en nappe libre, la cote de la surface libre de l'eau.

La détermination du niveau piézométrique se fait par la formule :

Niveau piézométrique (m) = Altitude de l'ouvrage (m) – Profondeur du niveau supérieur de la nappe(m).

La mesure de profondeur de la nappe est effectuée in situ à l'aide d'une sonde électrique ou d'une sonde divers.

La carte piézométrique est une véritable topographie de la nappe qui permet de déterminer son sens d'écoulement. Les zones de dômes piézométriques représentent les zones d'entrée des eaux de surface. Cette surface piézométrique est descriptive des zones de recharge induites.

Les données des campagnes piézométriques 2014 (voir Annexe 1) ont fait l'objet d'une interpolation manuelle suivi d'une numérisation pour obtenir une première carte piézométrique, cette carte est ensuite utilisée pour produire des nouvelles données. Ces nouvelles données sont introduites dans l'environnement Surfer pour élaborer une carte piézométrique. Cette démarche permet d'obtenir une carte piézométrique plus fiable.

II.3.3. Cartographie des zones de recharge induite

Cette étape consiste en la fusion et en la superposition des données ci-dessus énumérées. Le but est d'obtenir de nouvelles informations grâce à ces données, informations qui se traduisent par la représentation des divers résultats sur un seul et un même support afin de pouvoir effectuer une analyse plus globale.

À partir de la base de données de PADI BF-101 et grâce à ArcGIS , des cartes thématiques ont été élaborées. Ces cartes ont été ensuite superposées et/ou ont fait l'objet d'analyse permettant ainsi de dresser une carte de recharge induite et d'identifier les zones les plus favorables.

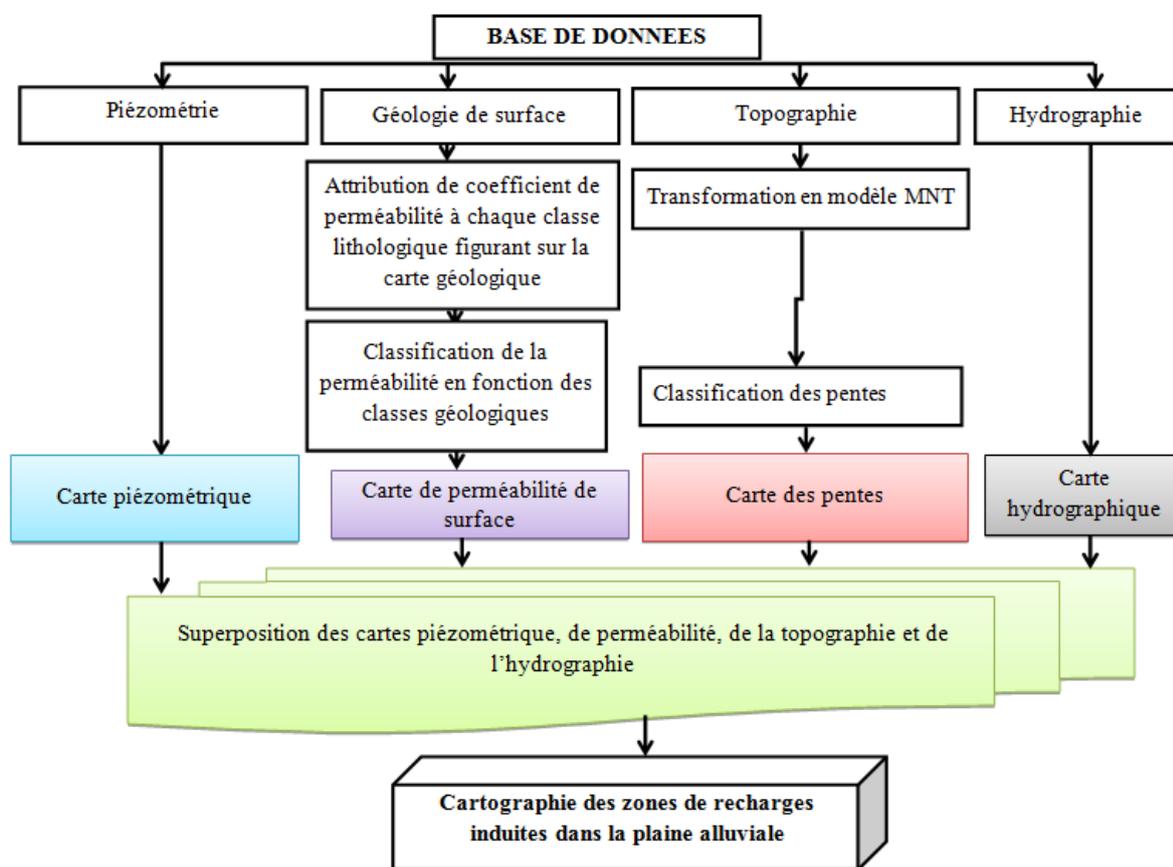


Figure 6: Organigramme des étapes de réalisation de la carte de la recharge induite

II.4. EVALUATION DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION

II.4.1. Notion de vulnérabilité à la pollution

La vulnérabilité est le « défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales » (Comité National Français des Sciences Hydrologiques).

Autrement dit, la vulnérabilité est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution. Elle caractérise la capacité de «protection» d'une nappe vis-à-vis d'une pollution dans les conditions naturelles.

Dans la littérature, les différentes études de vulnérabilité font généralement la distinction entre deux (02) notions d'évaluation de la vulnérabilité :

- **La vulnérabilité intrinsèque** : qui considère les conditions physiques naturelles de l'aquifère, La vulnérabilité intrinsèque est indépendante du polluant. La vulnérabilité intrinsèque décrit en effet la susceptibilité de la ressource en eau souterraine, à être affectée par une pollution de surface, diffuse ou ponctuelle.
- **La vulnérabilité spécifique**, qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels, mais également les propriétés du contaminant, des activités humaines ou même des populations à risque,

II.4.2. Evaluation des paramètres de vulnérabilité

Plusieurs paramètres interviennent dans le transfert de pollution à partir de la surface du sol:

- **Le niveau statique ou profondeur de la nappe**

C'est la distance verticale de la surface topographique à la surface piézométrique. C'est un paramètre important qui détermine l'épaisseur des matériaux à travers lesquels un contaminant peut circuler avant d'atteindre le plan d'eau (CHANDOUL et al, 2008).

Le cas le plus défavorable a été retenu à savoir le niveau statique en période des hautes eaux.

Pour la détermination de ce paramètre, nous avons utilisé les données du suivi piézométrique mené sur les piézomètres nivelés au DGPS dont dispose le site.

Ensuite une interpolation dans l'environnement ArcGIS permet d'élaborer la carte de profondeur de la nappe.

- **La recharge efficace**

La recharge efficace est la quantité totale d'eau qui atteint la surface piézométrique. Le processus de recharge est étroitement lié au cycle de l'eau qui est composé de la pluviométrie, de l'infiltration, du ruissellement et de l'évapotranspiration. La recharge est l'agent vecteur des contaminants. Généralement plus la recharge est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée (Ebtissem Riahi et al. In Samir Bouaziz et al. Ben.,2008).

Les études de DAO (2015), en utilisant la méthode du bilan de THORNTHWAITE et la méthode des fluctuations piézométriques, ont permis de quantifier cette recharge sur la plaine alluviale de Karfiguéla.

- **Les matériaux d'aquifère :**

Un aquifère est un réservoir d'eau souterraine. Les matériaux de l'aquifère déterminent la mobilité d'un éventuel contaminant dans cet aquifère. HALADOU (2013) a caractérisé les matériaux de la plaine par une combinaison de géophysique et d'analyse granulométrique établissant ainsi une coupe lithologique des piézomètres. Pour la détermination de ce paramètre, ces coupes lithologiques des piézomètres ont été utilisées (Voir Annexe 3). Ainsi, les couches dominantes ont été prises en compte.

- **Le type de Sol :**

Le type de sol est la portion au-dessus de la zone non saturée. Cette portion de sol, détermine la quantité d'eau infiltrée qui peut atteindre la surface piézométrique.

Le sol a un impact considérable sur la contamination des nappes phréatiques par les polluants provenant de la surface. Le sol peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation du polluant vers l'aquifère.

Ce paramètre correspond approximativement au premier dépôt à partir de la surface topographique. L'interpolation des couches de 0,5m des coupes lithologiques a permis d'obtenir ce paramètre.

- **La topographie:**

La topographie indique si un polluant fuira ou restera à la surface du sol pour s'infiltrer dans la nappe (Lynchez et al, 1994). La pente contrôle la probabilité qu'un polluant puisse être diffusé par les eaux de ruissellement en surface.

La couverture topographique est obtenue par interpolation des altitudes DGPS des piézomètres (HALADOU 2013). On obtient ainsi un MNT (modèle numérique de terrain) de la zone d'étude qui est aussi utilisé pour dériver une série d'autres données d'entrée: les

directions d'écoulement des eaux de surface et les classes de pente grâce à l'outil spatial Analyst de ArcGIS.

- **La zone non saturée :**

La zone non saturée ou zone vadose, représente la portion de terrain au-dessus du niveau de l'eau. La texture de cette zone détermine le temps de transfert du contaminant dans l'aquifère. La moyenne des niveaux statiques en période de hautes eaux est de 0,75 m ce qui nous amène à considérer la zone non saturée comme la couche de matériaux située entre 0,50 et 1 m. Les coupes lithologiques des piézomètres ont été utilisées pour l'élaboration de ce paramètre.

- **La conductivité hydraulique :**

Elle décrit la vitesse (distance par unité de temps) à laquelle l'eau se déplace à travers un aquifère (YANOGO, 2008). Cette vitesse varie selon le type de roche, la porosité, la pente de la surface piézométrique et le degré d'interconnexion des pores. Elle contrôle la vitesse de propagation du polluant dans l'aquifère : plus la conductivité est élevée, plus le transfert du polluant est rapide.

Les travaux de BETAN 2013, à travers la méthode d'essai de choc hydraulique dite « slug test » ont permis la détermination des valeurs de conductivité hydraulique (Voir Annexe 2).

- **L'occupation du sol**

La carte de l'occupation du sol est un paramètre déterminant dans l'utilisation et la gestion du territoire. Elle traduit les activités anthropiques et/ou l'occupation naturelle des terres (végétation). L'occupation des sols informe sur le potentiel d'émission d'un polluant à la surface du sol.

Les informations sur l'occupation du sol de la plaine de Karfiguéla proviennent de la Base de Données d'Occupation des Terres (BDOT 2002) disponibles à l'IGB.

Les caractéristiques des différentes classes d'occupation du sol sont clairement définies dans la notice qui accompagne cette base de données (IGN-FI, 2005).

II.4.3. Méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution

Plusieurs techniques permettent l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères. Ces techniques peuvent être regroupées en trois (Kimmeier, 2001) :

- les méthodes hydrogéologiques de type matriciel

- les méthodes des systèmes de ration
- les méthodes de ration et de paramètres pondérés

Pour l'étude de la vulnérabilité les méthodes DRASTIC, GOD et SI ont été utilisées

• **La méthode DRASTIC**

La méthode DRASTIC, développée en 1987 aux Etats-Unis par la *National Water Well Association* (Aller et al. 1987) pour le compte de l'Agence américaine de la Protection de l'Environnement (US EPA), est une méthode standardisée d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines indépendamment du type de polluant.

Elle repose sur ces quatre (04) hypothèses (Kouamé et al, 2007) :

- La source de contamination potentielle est située à la surface du sol ;
- Les contaminants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par infiltration ;
- Les contaminants à la même mobilité que l'eau souterraine ;
- Le type de contaminant ne se dégrade pas

La méthode DRASTIC prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques qui affectent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines (Mohamed, 2001 in Kouame, 2007)

Ces paramètres au nombre de sept 7 sont :

D : (Depth to groundwater) Profondeur de la nappe

R : Recharge nette

A : (Aquifer media) nature lithologique de l'Aquifère

S : (Soil media) type de Sol :

T : (Topography) Topographie des terrains

I : (Impact of vadose zone) Impact de la zone non saturée (lithologie et épaisseur)

C : (Conductivity) Conductivité Hydraulique de la zone saturée

L'importance relative de chaque paramètre est évaluée par un poids fixe, variant entre une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs qui le sont moins.

Chaque paramètre se voit attribuer une cote variant entre 1 et 10 en fonction des conditions locales ; les conditions de moindre vulnérabilité procurent des cotes faibles tandis que celles qui l'augmentent procurent des cotes élevées.

Le tableau ci-dessous présente les poids et cotes préconisés pour l'évolution des sept paramètres :

Paramètres	Poids	Classes	Cotes
D: distance à la nappe ou épaisseur de la zone non saturée (en mètres)	5	0 – 1.5	10
		1.5 – 4.5	9
		4.5 – 9	7
		9 – 15	5
		15 – 23	3
		23 – 30	2
		> 30	1
R: recharge ou pluie efficace	4	0 – 50	1
		50 – 100	3
		100 – 175	6
		175 – 225	8
		> 225	9
A: lithologique de l'aquifère	3	Massive shale	2
		Roches ignées ou métamorphiques	3
		Roches ignées ou métamorphiques altérées	4
		Calcaire massif	8
		Grès massif	6
		Sable et gravier	8
		Basalte	9
		Calcaire Karstique	10
S: nature du sol	2	Mince ou absent	10
		Graviers	10
		Sables	9
		Limons sableux	6
		Limons	4
		Limons siliceux	3
		Argiles	1
T: topographie des terrains exprimée par la pente (en %)	1	0 à 2	10
		2 à 6	9
		6 à 12	5
		12 à 18	3
		> 18	1
I: nature de la zone non saturée	5	Silt et argile	3
		Shale	3
		Calcaire	3
		Grès	6
		Sable et gravier avec passage silt et argile	6
		Sable et gravier	8

		Basalte	9
		Calcaire Karstique	10
C: perméabilité (m/s)	3	$1,5.10^{-7} - 5.10^{-5}$	1
		$5.10^{-5} - 15.10^{-5}$	2
		$15.10^{-5} - 33.10^{-5}$	4
		$33.10^{-5} - 5.10^{-4}$	6
		$5.10^{-4} - 9,5.10^{-4}$	8
		$> 9,5.10^{-4}$	10

Tableau 2 : Cotes et Poids DRASTIC des paramètres de la vulnérabilité (Mohamed 2001 in Yanogo 2008)

La vulnérabilité est évaluée par l'indice DRASTIC qui est un indice numérique représentant la somme pondérée de 7 cotes correspondant aux 7 paramètres hydrogéologiques décrits ci-dessus. L'indice local est obtenu en multipliant la cote de chaque paramètre par son poids relatif et en faisant la somme de ces produits:

$$ID = (D_r D_w) + (R_r R_w) + (A_r A_w) + (S_r S_w) + (T_r T_w) + (I_r I_w) + (C_r C_w)$$

Avec : **r** pour Rating (cote) et **w** pour weight (poids).

Les valeurs de l'indice DRASTIC représentent une mesure de la vulnérabilité de l'aquifère. Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices DRASTIC calculés.

Vulnérabilité	Indice DRASTIC
Très faible	23 à 80
Faible	80 à 100
Moyenne	100 à 140
Forte	140 à 180
Très élevée	180 à 226

Tableau 3 : Classification des indices de vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987)

L'organigramme ci-dessous résume les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC:

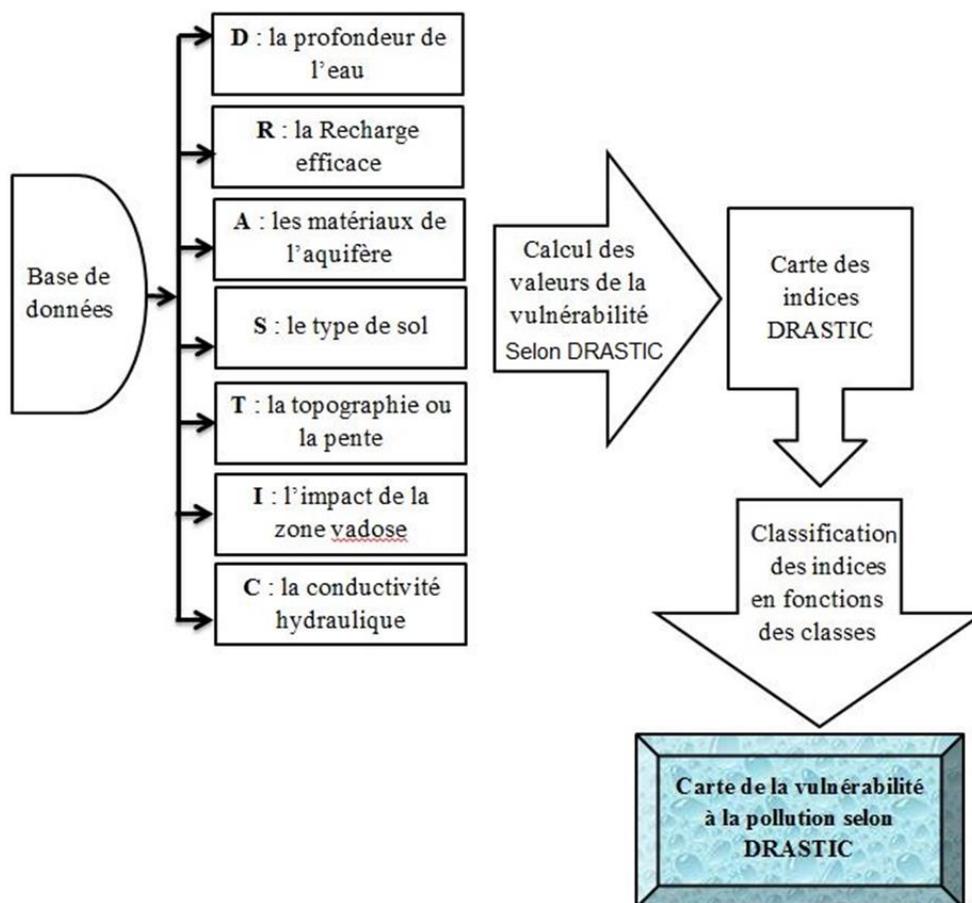


Figure 7: Organigramme de la cartographie de vulnérabilité par la méthode DRASTIC

• Méthode GOD

Comme la méthode DRASTIC, GOD est une méthode des systèmes paramétriques. Par contre, elle nécessite moins de paramètres que DRASTIC.

Il s'agit d'une méthode conçue en Angleterre en 1987 par Foster (Murat et al., 2000).

L'appellation de la méthode provient d'un acronyme anglais: Groundwater occurrence, Overall aquifer class et Depth to water table. Elle permet de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (Bézelgues et al., 2002 in Kouamé, 2007) à partir des trois paramètres de vulnérabilité ci-dessous:

G : (Groundwater occurrence) type de nappe en fonction de son degré de confinement qui sert à déterminer si l'aquifère est libre ou captif

O : (Overall aquifer class) lithologie de la Zone non saturée

D : (Depth to groundwater) Profondeur de la nappe

Les notes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à 1.

L'indice de vulnérabilité GOD (IGOD) est obtenu par la multiplication des cotes de chacun des trois paramètres (Murat et al., 2000) selon la formule:

$$IGOD = G_n \times O_n \times D_n$$

Paramètres	Classes	Cotes
G : Type d'aquifère	Artésien	0,1
	Confiné	0,2
	Semi-confiné	0,3
	Libre avec couverture	0,4 – 0,6
	Libre	0,7–1
O : Lithologie de la zone non saturée	Sol résiduel	0,4
	Limon alluvial, loess, calcaire fin	0,5
	Sable éolien, siltite, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0,6
	Sable et gravier, grès	0,7
	Gravier (colluvion)	0,8
	Calcaire	0,9
	Calcaire fracturée ou karstique	1
D : Profondeur de la nappe(en mètres)	0 – 1.5	1
	1.5 – 4.5	0,9
	4.5 – 9	0,8
	9.0 – 15.0	0,7
	15 – 23	0,6
	23 – 30	0,4
	> 30	0,4

Tableau 4 : Poids GOD des paramètres de la vulnérabilité (Kouamé,2007)

La classification de la carte des indices GOD en tenant compte de la vulnérabilité permet l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de Karfiguéla

Classe GOD	Intervalle
Vulnérabilité très faible	0 - 0,1
Vulnérabilité faible	0,1 - 0,3
Vulnérabilité modéré	0,3 - 0,5
Vulnérabilité élevée	0,5 - 0,7
Vulnérabilité extrême	0,7 - 1

Tableau 5 : Classification des indices de vulnérabilité GOD (Murat et al., 2003 in Kouamé,2007)

Les différentes étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode GOD sont résumées dans l'organigramme ci-dessous :

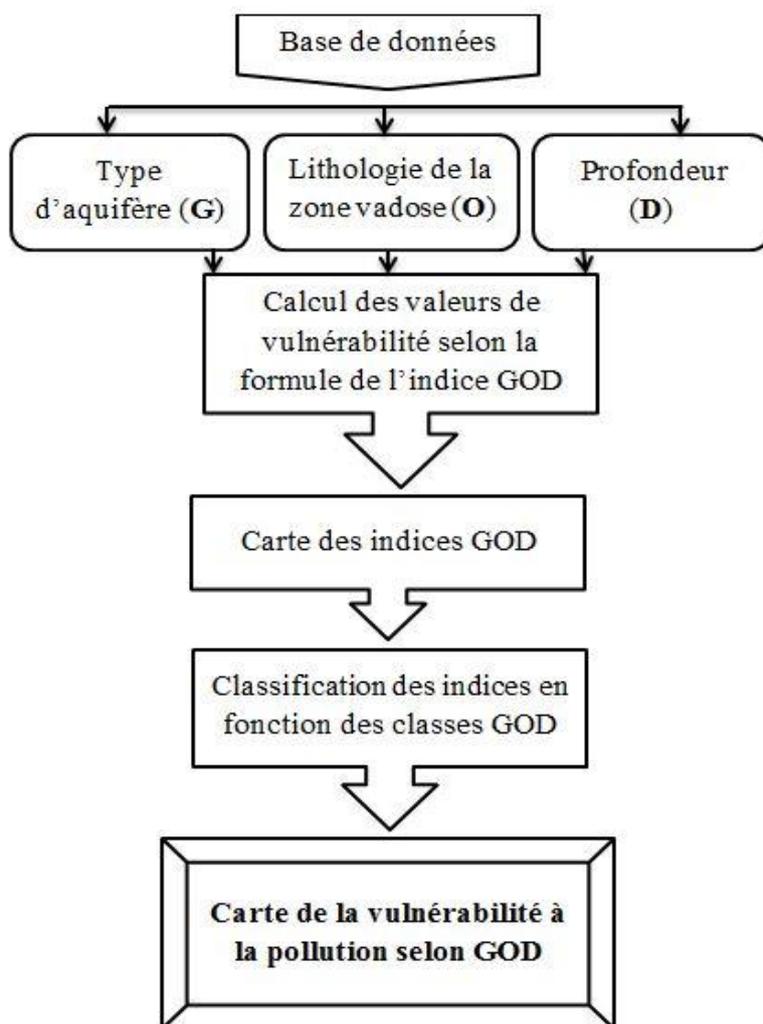


Figure 8: Organigramme de la cartographie de vulnérabilité à partir de la méthode GOD

• Méthode SI

La méthode d'indice de susceptibilité (SI) est une méthode de vulnérabilité verticale spécifique, développée au Portugal par Ribeiro en 2000. Elle prend en compte les polluants d'origine agricole notamment les nitrates et les pesticides.

Elle utilise cinq paramètres :

D : (Depth to groundwater) Profondeur de la nappe

R : Recharge nette

A : (Aquifer media) nature lithologique de l'Aquifère

T : (Topography) Topographie des terrains

OS : (Land use) Occupation du sol.

L'élaboration de la carte de vulnérabilité, est effectuée par le calcul de l'indice de vulnérabilité (ISI) donnée par la formule:

$$ISI = DcxDp + RcxRp + AcxAp + TcxTp + OcxCp$$

Ou les indices c et p désignent respectivement la cote et le poids du paramètre.

Dans la méthode SI, les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà pris en compte dans la méthode DRASTIC en multipliant les cotes par 10.

Le nouveau paramètre Occupation des sols a une cote variant de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols.

Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité

Paramètres	Poids	Classes	Cotes
D: Profondeur de la nappe (en mètres)	0,186	0 – 1.5	100
		1.5 – 4.5	90
		4.5 - 9	70
		9.0 – 15.0	50
		15 - 23	30
		23 - 30	20
		> 30	10
R: recharge (en mm/an)	0,212	0 – 50	10
		50 - 100	30
		100 - 175	60
		175 - 225	80
		> 225	90
A: lithologie de l'aquifère	0,259	Massive shale	20
		Roches ignées ou métamorphiques	30
		Roches ignées ou métamorphiques altérées	40
		Calcaire massif	80
		Grès massif	60
		Sable et gravier	80
		Basalte	90
		Calcaire Karstique	100
T: topographie des terrains exprimée par la pente (en degré)	0,121	0 à 2	100
		2 à 6	90
		6 à 12	50
		12 à 18	30
		> 18	10
OS: Occupation des sols	0,222	Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
		Périmètre irrigués, rizière, cultures annuelles irrigués et non irrigués	90
		Carrière, chantier naval	80

	Zones artificielles couvertes, zones vertes, zones urbaines continues	75
	Cultures permanentes (vignes, verges, olivier, etc...)	70
	Zones urbaines discontinues	70
	Pâturages et zones agro-forestières	50
	Milieus aquatiques (marais, salines, etc.)	50
	Forêts et zones semi-naturelles	0

Tableau 6 : Poids et Cotes SI des paramètres de vulnérabilité (Khemiri et al, 2013)

Les indices de susceptibilité calculés représentent le niveau de risque de la vulnérabilité de l'aquifère. Ce risque prend une valeur qui est inférieure à 45 et une valeur maximale de 100. Après le calcul de l'indice de susceptibilité, le degré de vulnérabilité se définit suivant le tableau ci-dessous:

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45 - 64
Elevé	65 - 84
Très élevé	85 - 100

Tableau 7 : Classification des indices de vulnérabilité SI (Khemiri et al, 2013)

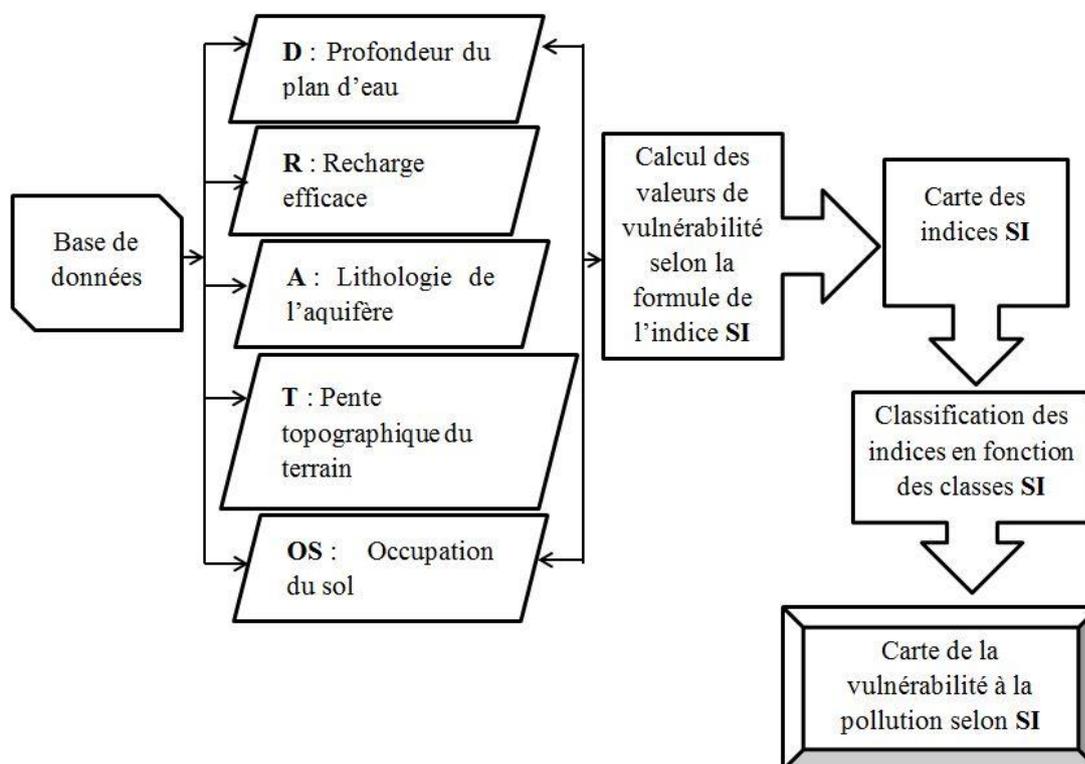


Figure 9: Organigramme de la cartographie de la vulnérabilité à partir de la Méthode SI

II.4.4. Etude comparative des méthodes

L'analyse de surface permet de connaître la différence qui existe entre les cartes de vulnérabilité élaborées par les différentes méthodes.

Dans l'analyse statistique de surfaces deux aspects sont à considérer :

- la ressemblance des cartes implique des valeurs d'indices identiques d'une carte à l'autre ;
- la concordance implique des cartes qui s'accordent pour la variation des indices d'une zone à l'autre, mais qui ne classent pas les zones avec la même évaluation de l'indice.

En effet, deux cartes de vulnérabilité peuvent être concordantes sans présenter les mêmes indices. La concordance des cartes se traduit par des variations d'indices semblables d'une carte à l'autre sur l'ensemble du territoire (Murat, 2000 in Kouamé 2007).

Pour cette étude, des indices ont été assignés à chaque classe de vulnérabilité comme suit :

Classe de vulnérabilité	Indice
Très faible	0
Faible	1
Moyenne	2
Forte	3
Très forte	4

Tableau 8 : Indices et Classe de la vulnérabilité

En outre, la surface occupée par chaque classe a été calculée et transformée en pourcentage.

La comparaison deux à deux des surfaces cartographiées par les méthodes permet de connaître la tendance d'évaluation de la vulnérabilité.

A partir de l'outil, "*raster calculator*" du module Spatial Analyst de ArcGIS, la différence des cartes de vulnérabilité a été réalisée deux à deux. En fonction du signe de l'opération, le tableau ci-dessous permet de donner la tendance de l'évaluation de la vulnérabilité. La valeur **nulle** de l'opération indique que les deux méthodes effectuent une évaluation identique

Soit A et B les deux méthodes de cartographies de vulnérabilité à comparer :

Opération	Signe de l'opération	Tendance de l'évaluation
A-B	Négatif	A sous-évalue par rapport à B
A-B	Positif	A sur-évalue par rapport à B

II.4.5. Etude du risque de pollution

Le risque de pollution résulte du croisement de tous les scénarii possibles de pollution dans la plaine alluviale, comme la distribution spatio-temporelle du polluant (pollution ponctuelle ou diffuse, instantanée ou continue), de la probabilité d'occurrence des évènements polluants, et de l'ampleur des conséquences de cette pollution. Il s'agit donc de l'interaction entre la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution et les activités anthropiques comme sources de contamination. Le potentiel polluant peut être d'origine agricole (engrais et pesticides) ou urbaine (rejets industriels, eaux usées, polluées, et lessivages des déchets).

La combinaison de ces paramètres permet de dégager les degrés de risque, en tenant compte de degré de vulnérabilité et de l'absence (-) ou la présence (+) des sources polluantes, susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines.

Cette combinaison permet de classer le degré de risque en cinq classes (tableau 9).

Degré de vulnérabilité	Source de pollution	Degré de risque
Très faible	+	Faible
Très faible	-	Très faible
Faible	+	Moyen
Faible	-	Très faible
Moyen	+	Elevé
Moyen	-	Faible
Elevé	+	Très élevé
Elevé	-	Moyen
Très élevé	+	Très élevé
Très élevé	-	Elevé

Tableau 9 : Classification du degré de Risque (SMIDA, 2008)

III. ANALYSES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

III.1. ÉTUDE DE LA RECHARGE INDUITE

III.1.1. Analyse des facteurs de recharge sur la plaine de Karfiguéla

- **Géomorphologie : topographie**

Le relief dans la plaine de Karfiguéla est très plat dans son ensemble et présente ainsi de faibles pentes. La pente moyenne est inférieure à 1%. Cette faible pente empêche le ruissèlement des eaux de surfaces et favorise leur infiltration.

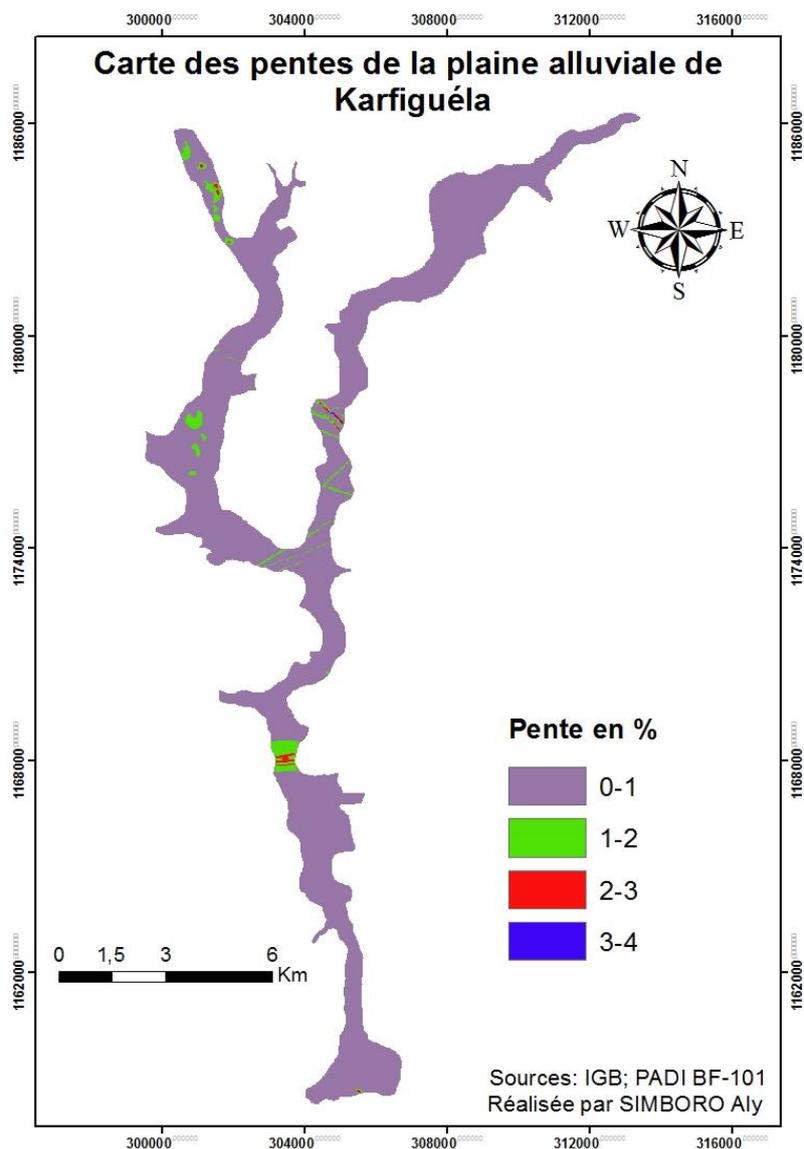


Figure 10 : Carte des pentes de la plaine alluviale de Karfiguéla

- **Hydrographie**

La plaine se trouve sur la Comoé qui est un cours d'eau pérenne. En amont de la plaine, se trouve bon nombre de ramifications (figure 4) de cours d'eau qui lui assurent un débit assez important durant toute l'année.

- **Sol : perméabilité**

La majorité des affleurements dans la plaine de Karfiguéla sont constitués par des alluvions essentiellement par des sables, argiles et limons.

La carte de perméabilité (figure 11) obtenue à partir des sols montre que les zones formées par des sables sont les plus favorables à l'infiltration des eaux de surface et donc à

l'alimentation des nappes. Le reste de la zone d'étude présente des terrains moins favorables à l'infiltration.

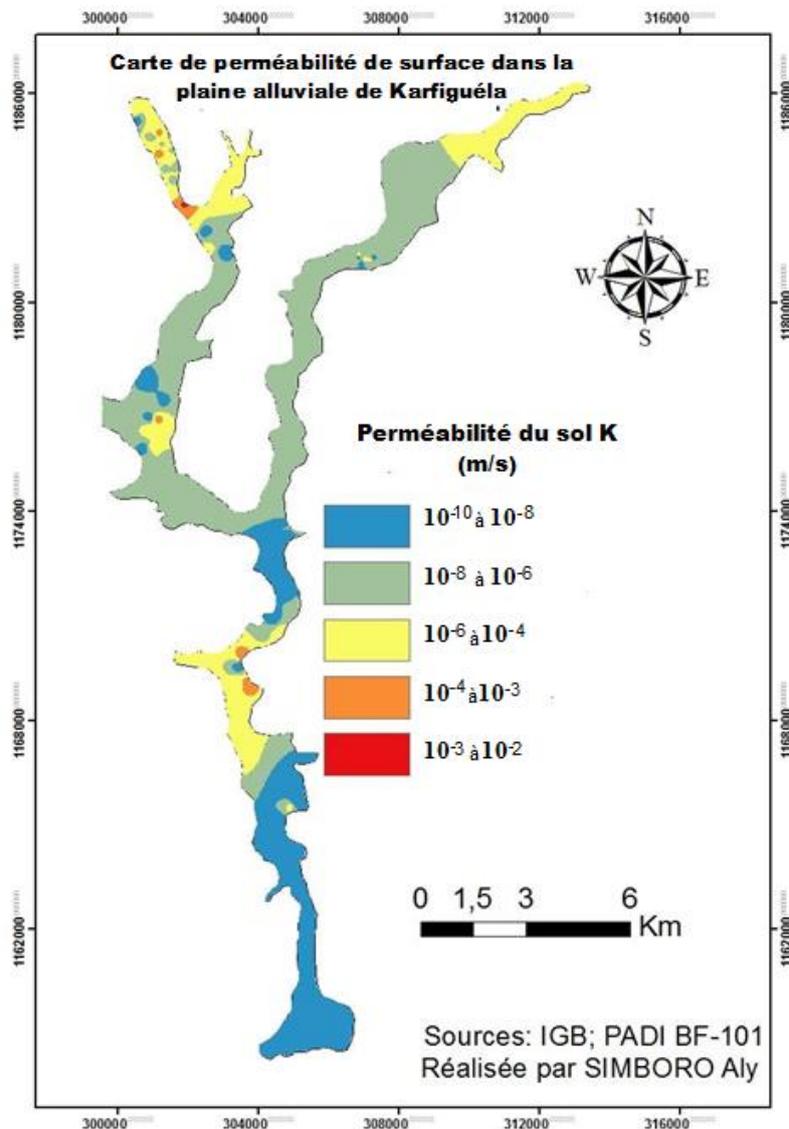


Figure 11 : Carte de la perméabilité de surface de la plaine alluviale de Karfiguéla

- **La piézométrie**

La carte piézométrique (figure 12) donne un écoulement général de la nappe du Nord vers le Sud.

Les hauts niveaux piézométriques sont remarquables à l'extrême Nord -Est de la plaine (localité de Banfora Nord), à Karfiguéla et au sud de Sitiéna. Les eaux souterraines s'écoulent de ces points hauts vers les points bas.

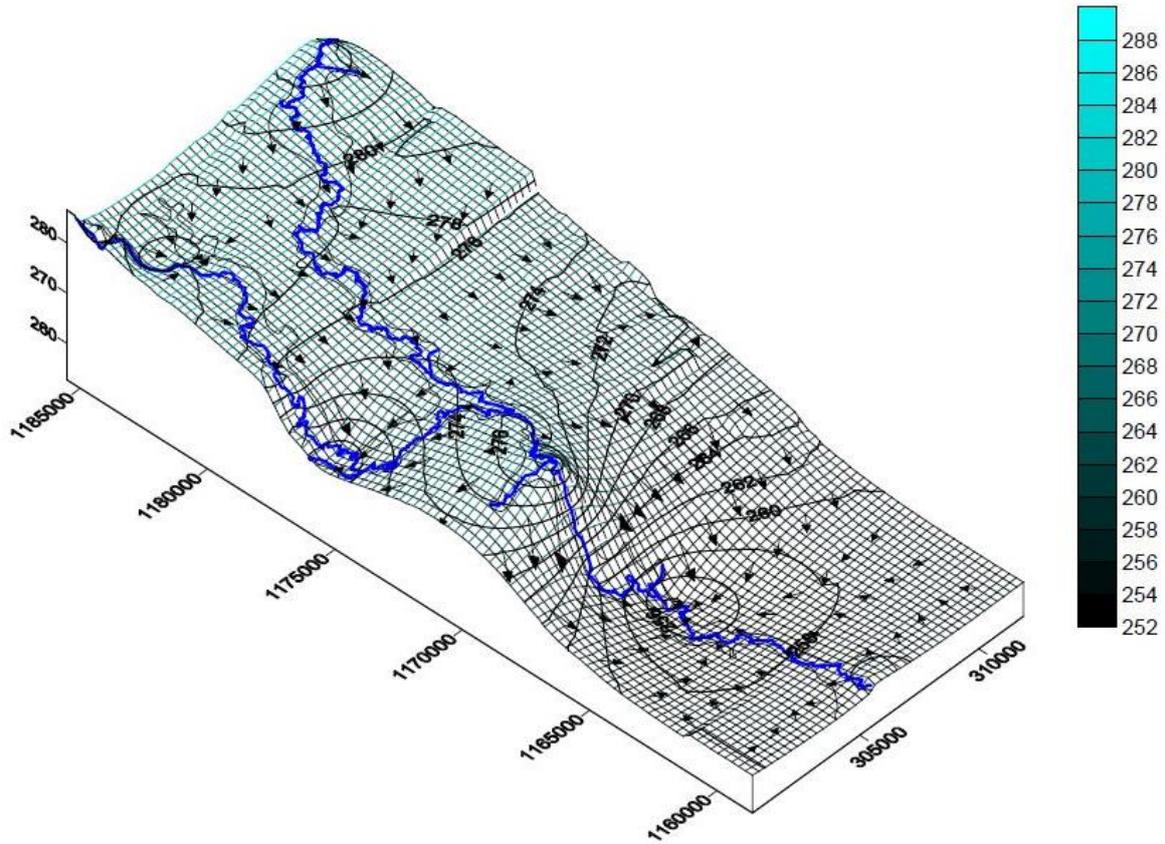


Figure 12: Carte piézométrique 3D dans la plaine alluviale de Karfiguéla

III.1.2. Indentification des zones de recharge induite

La superposition des données a permis l'élaboration d'une carte des zones de recharge induite :

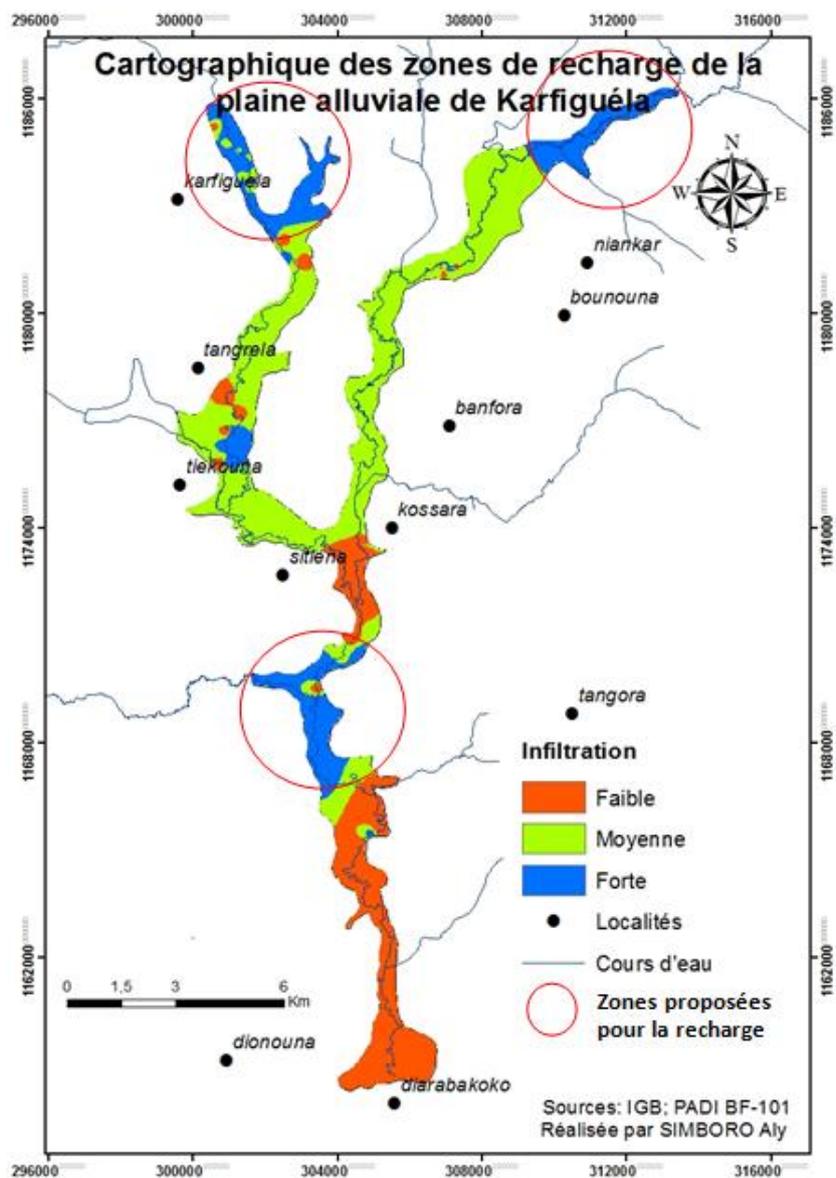


Figure 13 : Carte des zones de recharge induite de la plaine alluviale de Karfiguéla
Le Tableau 10 révèle une distribution des surfaces en fonction des différentes classes des zones d'infiltration de la plaine alluviale de Karfiguéla.

Degré d'infiltration	Pourcentage (%)
Faible	25,22
Moyenne	53,10
Forte	21,68

Tableau 10 : Pourcentage des surfaces en fonction des degrés d'infiltration

Cette cartographie des zones de recharge induite obtenue (Figure 13) permet de mettre en évidence trois classes d'infiltration :

- Une classe d'infiltration faible: elle est localisée au Sud (aval du fleuve) et représente environ 25,22 % de la plaine, et caractérise essentiellement les zones, où la profondeur de la nappe est assez élevée. Le degré d'infiltration faible, peut s'expliquer par la nature argileuse du sol qui a une faible valeur de perméabilité de la couche d'argile (10^{-10} à 10^{-8} m/s).
- Une classe d'infiltration moyenne : Elle s'étend entre les zones de fortes perméabilités et celles de faibles perméabilités sur une proportion assez importante soit 53,10 % de la zone d'étude formée essentiellement limon et d'argile sableuse. Cette infiltration moyenne peut s'expliquer par la perméabilité moyenne des alluvions, favorable à l'infiltration des eaux de surface et donc à l'alimentation des nappes.
- Une classe d'infiltration forte : Cette classe occupe 21,68 % et se rencontre sur les sites de Karfiguéla, de Banfora Nord et au Sud de Sitiéna essentiellement formés des sables ainsi que les éléments grossiers. Les zones d'infiltration forte correspondent à des cuvettes susceptibles à la fois de récupérer les eaux de surfaces mais aussi de constituer des zones favorables à la recharge des nappes. La classe d'infiltration forte est due à la perméabilité très élevée des alluvions (10^{-6} - 10^{-2} m/s). Tous ces paramètres nous permettent d'observer à la fois les zones de circulation et de stockage des eaux de ruissellement et donc à l'alimentation de la nappe dans la plaine alluviale. Ces zones de fortes infiltrations correspondent aux zones de hautes cotes piézométriques. Les eaux de la nappe s'écoulent de ces zones vers les zones de basses piézométries.

Les recharges importantes de la nappe se font donc à Karfiguéla, Banfora Nord et au Sud de Sitiéna

III.2. ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SUR LA PLAINE

III.2.1. Analyse des paramètres et cartographie thématique

- **Profondeur de la nappe**

La carte de la bathymétrie (Figure 14) a permis les observations suivantes :

Le sud et l'extrême Nord-Est sont des zones de faible profondeur

Le Centre et l'extrême Nord-Ouest sont les zones où la profondeur est assez élevée.

Mais en général la nappe est peu profonde, les niveaux statiques se situent entre 0,00 et 1,68 m. Donnant des valeurs de cotes élevées pour ce paramètre.

Les cotes attribuées selon les différentes méthodes sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Cotes obtenues par méthodes			
Profondeur de la nappe (en m)	DRASTIC	GOD	SI
0 – 1.5	10	1	100
1.5 – 2	9		90

Tableau 11 : Cotes attribuées pour la profondeur de la nappe

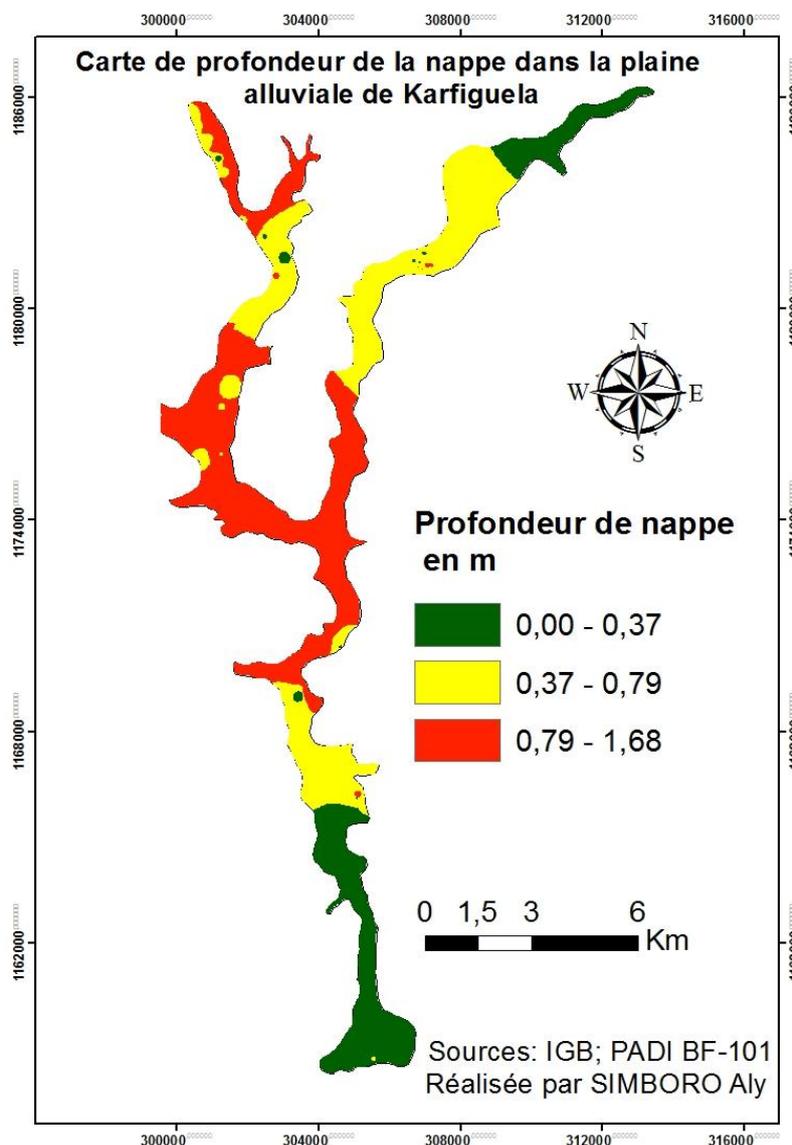


Figure 14 : Carte de profondeur de la nappe de la plaine alluviale de Karfiguéla

- **La recharge efficace :**

La recharge efficace est faible et de l'ordre de 40 mm/an. Les résultats de l'étude de la recharge induite ont permis d'identifier les zones de faible recharge et les zones de forte recharge (Figure 15). L'attribution des cotes s'effectue en tenant compte de ces zones de recharge dont les valeurs varient entre 20 et 70 mm/an. Les valeurs des cotes attribuées pour

la recharge efficace sont faibles.

Cotes attribuées par méthodes		
Recharge efficace(en mm/an)	DRASTIC	SI
Faible	1	10
Forte	3	30

Tableau 12 : Cotes attribuées pour la recharge

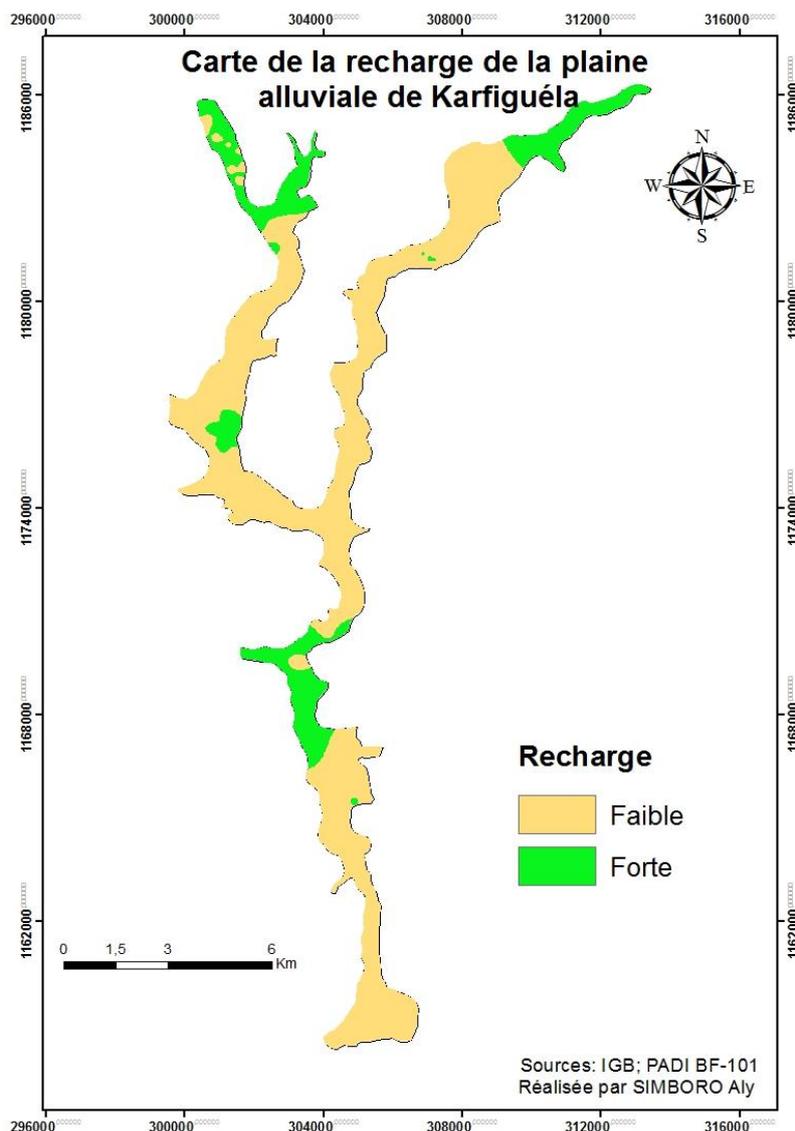


Figure 15 : Carte de la recharge de la plaine alluviale de Karfiguéla

- **Matériaux ou lithologie de l'aquifère (A) :**

La plaine alluviale de Karfiguéla a une nappe libre. L'aquifère superficiel est constitué d'alluvions essentiellement argile, limon et sable comme indiquer sur la carte. L'attribution des cotes s'effectue en tenant compte de la capacité de transmissivité des matériaux de

l'aquifère.

Le tableau ci-dessous résume les cotes attribuées :

Cotes obtenues		
Type d'aquifère /matériaux	DRASTIC	GOD
Nappe libre	Argile	2
	Argile limoneux	3
	Sable argileux	5
	Sable limoneux	6
	Sable	8
		0,8

Tableau 13 : Cotes attribuées pour l'aquifère

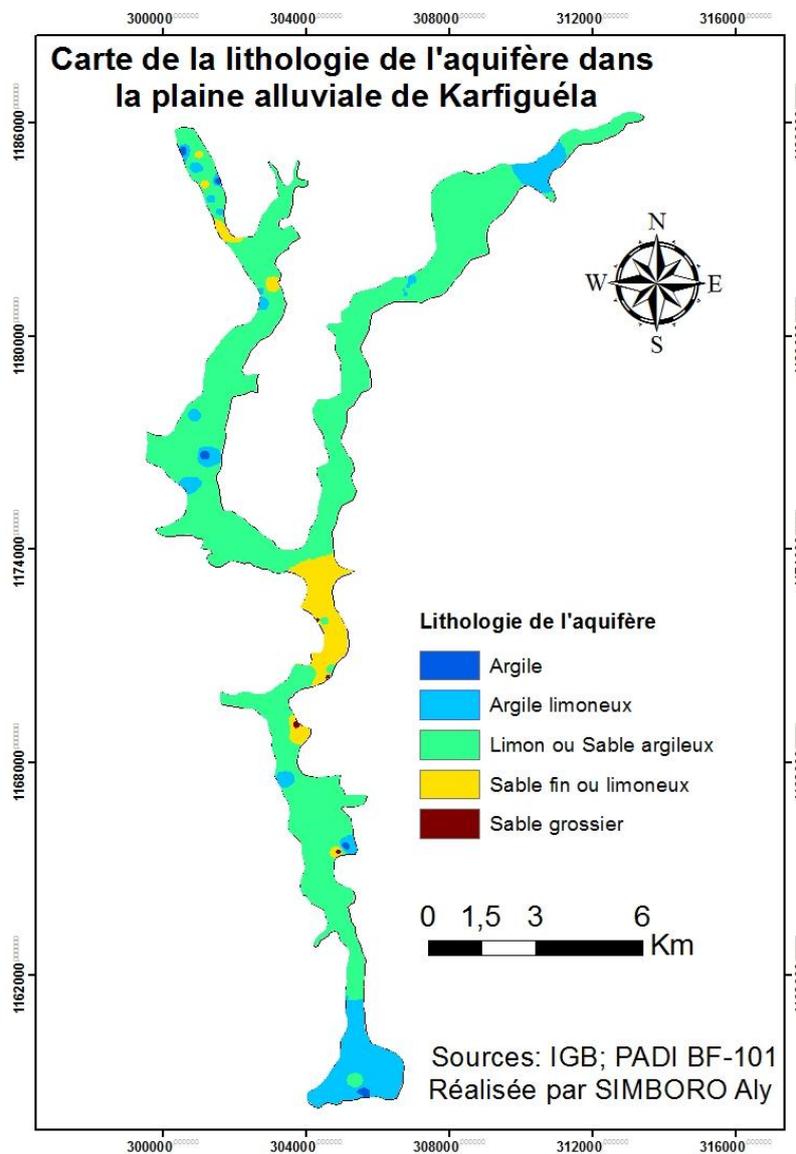


Figure 16 : Carte de la lithologie de l'aquifère de la plaine alluviale de Karfiguèla

- **Type de Sol :**

La carte ci-dessous montre que les sols de la plaine alluviale de Karfiguéla sont en majorité argileux. L'attribution des cotes s'effectue en tenant compte de la capacité de rétention de la des sols. La classification suivante a été adoptée :

Cotes obtenues	
Type de sol	DRASTIC
Argile	1
Argile limoneux	3
Sable argileux	4
Sable limoneux	6
Sable	9

Tableau 14 : Cotes attribuées pour le type de sol

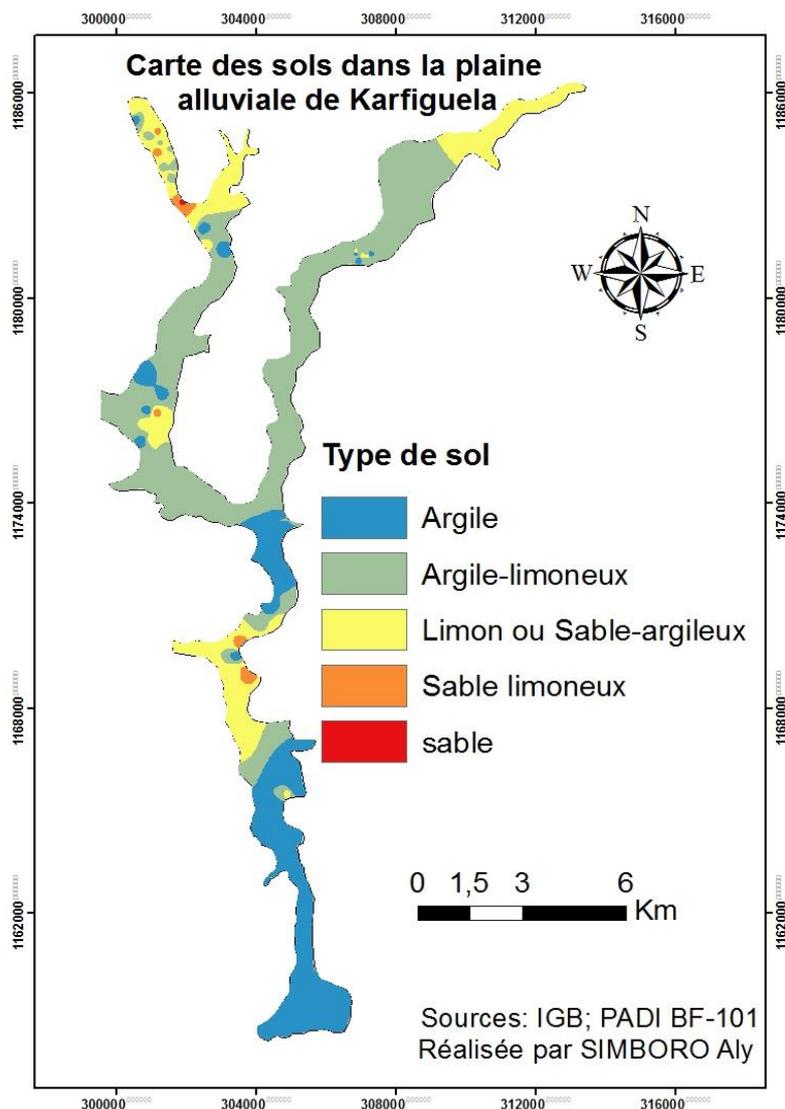


Figure 17 : Carte des sols de la plaine alluviale de Karfiguèla

- **La topographie**

La plaine est caractérisée par une topographie plane. Les pentes calculées sur la carte donnent des valeurs très faibles qui sont inférieures à 1% sur la majeure partie du site (Figure 10).

Les valeurs des cotes attribuées pour ce paramètre sont fortes

Cotes obtenues par méthodes		
Pente en %	DRASTIC	SI
0 à 2	10	100
2 à 4	9	90

Tableau 15 : Cotes attribuées pour la pente

- **La zone non saturée**

Au niveau de la nappe de Karfiguéla, pour ce paramètre les formations d'argile, limon, sable argileux, et de sable ont été observées. (Figure 18) Ainsi pour la cotation de ce paramètre, la perméabilité des différentes unités a guidé l'attribution des cotes. La classification suivante a été adoptée :

Cotes obtenues		
Zone non saturée	DRASTIC	GOD
Argile	3	0,55
Argile limoneux	5	0,62
Sable argileux	6	0,64
Sable limoneux	7	0,66
Sable	8	0,68

Tableau 16 : Cotes attribuées pour la zone non saturée

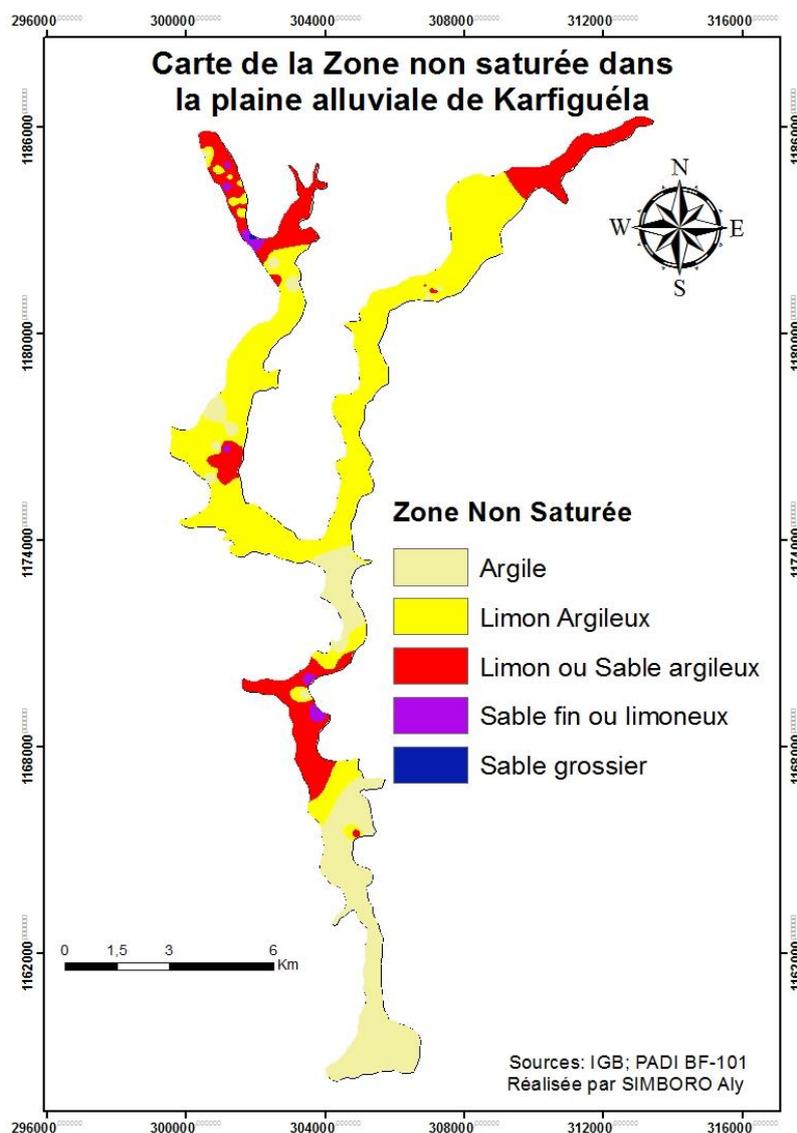


Figure 18 : Carte de la zone non saturée de la plaine alluviale de Karfiguéla

• **La Conductivité hydraulique**

Les valeurs des cotes attribuées aux différents intervalles de conductivité hydraulique, selon DRASTIC, sont consignées dans le tableau :

Cotes obtenues	
Conductivité (m/s)	DRASTIC
$1,5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$	1
$5 \cdot 10^{-5} - 15 \cdot 10^{-5}$	2
$15 \cdot 10^{-5} - 33 \cdot 10^{-5}$	4
$33 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$	6

Tableau 17 : Cotes attribuées pour la conductivité hydraulique

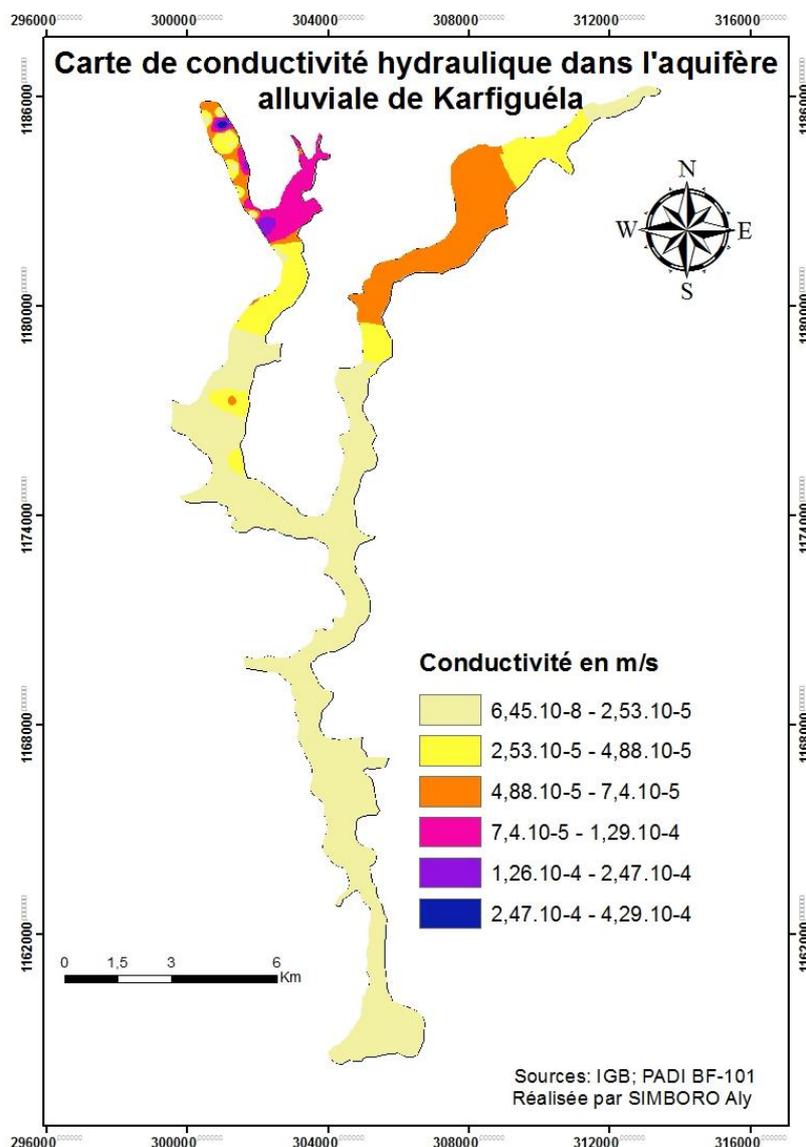


Figure 19 : Carte de la conductivité hydraulique de la plaine alluviale de Karfiguéla

- **Occupation du sol**

La plaine est une zone essentiellement agricole avec des rizières, des périmètres irrigués et des plantations sur plus de 90% de la surface.

Seule la méthode SI est concernée par ce paramètre, les cotes des classes d'occupation des sols sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Classe d'occupation des sols	Cotes
Périmètre irrigués, rizière, cultures annuelles (pluviale, plantation)	90
Systemes culturaux et parcellaires complexes	75
Cultures permanentes (territoires agricoles)	70
Savane	50
Foret et zones semi naturelles	0

Tableau 18 : Cotes attribuées pour l'occupation des sols

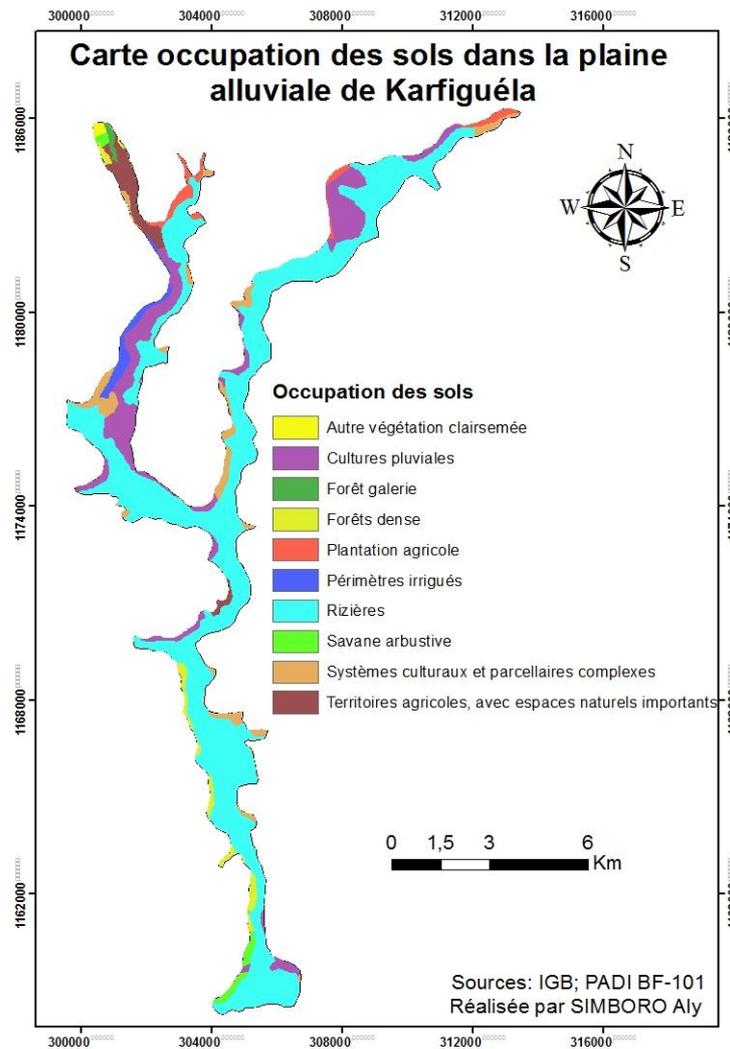


Figure 20 : Carte de l'occupation des sols de la plaine alluviale de Karfiguéla

III.2.2. Caractérisation de la vulnérabilité à la pollution dans la plaine alluviale de Karfiguéla

- **Caractérisation de la vulnérabilité selon la méthode DRASTIC**

Les valeurs des indices obtenus oscillent entre 93 et 154 comme présenté sur la carte

Les fortes valeurs se situent dans les zones où la perméabilité du sol est importante (sol sableux)

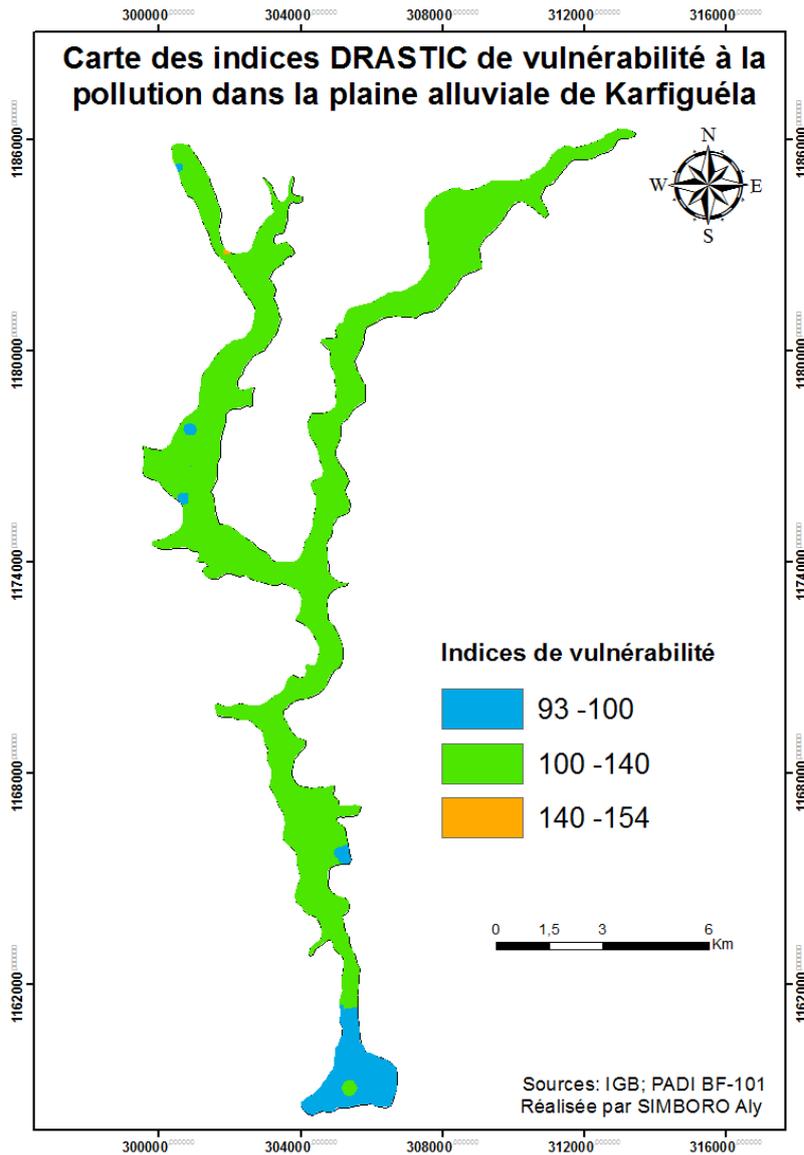


Figure 21 : Carte des indices DRASTIC de la plaine alluviale de Karfiguéla

La carte issue de la classification définie par Aller et *al.* (1987) est illustrée à la figure 22.

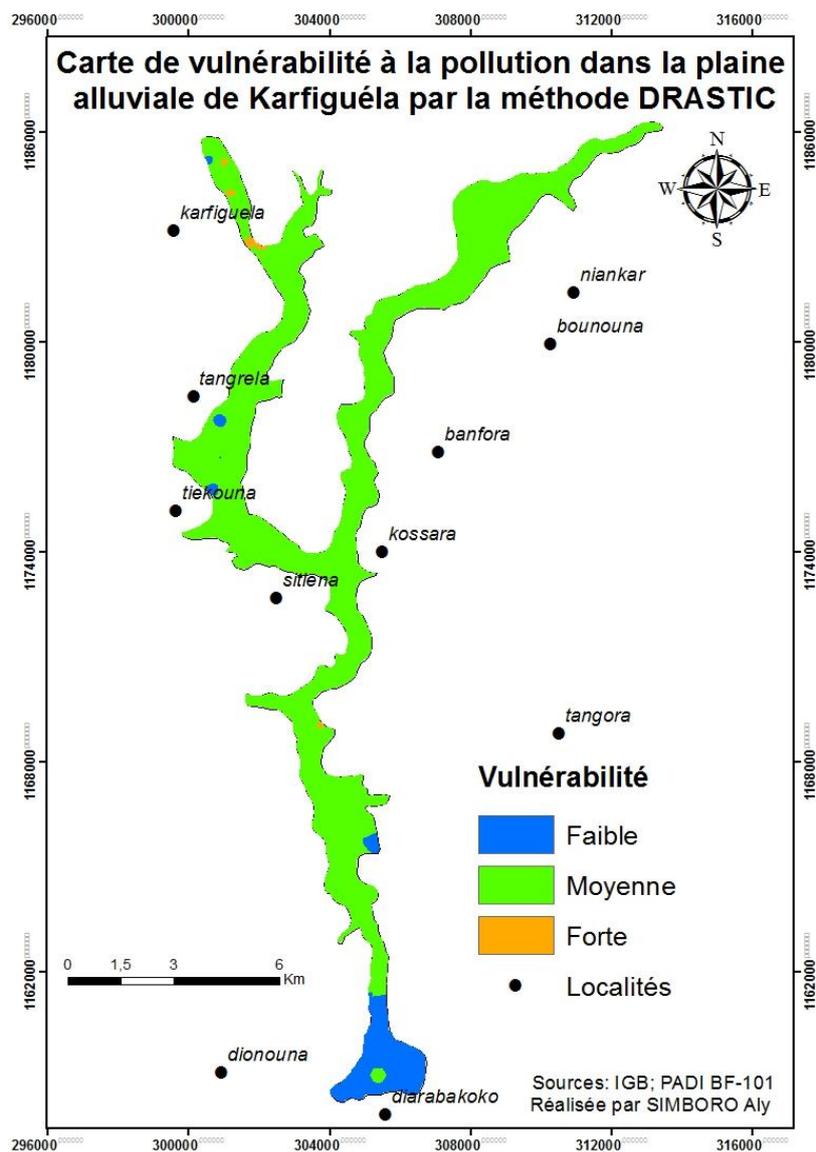


Figure 22 : Carte de vulnérabilité DRASTIC de la plaine alluviale de Karfiguéla

La carte de vulnérabilité DRASTIC révèle trois (3) classes de vulnérabilité :

Classe **Faible** : cette classe n'occupe pas une grande partie de la zone d'étude (8,9%). Elle traduit une vulnérabilité faible à la pollution. Le faible indice de vulnérabilité observé peut s'expliquer par le fait que la zone vadose et le sol de cette partie sont constitués essentiellement d'argile.

Classe **Moyenne** : Avec 90,60% des surfaces de la zone d'étude, elle est la classe dominante selon la méthode DRASTIC. Elle garantit une pollution moins sévère dans le cas d'une contamination. Ce degré de vulnérabilité moyen, peut être lié à la nature de la zone non saturée constituée d'argile qui est peu perméable.

Classe **Forte** : très infime, cette classe n'occupe que 0,50% de la nappe de Karfiguéla et serait liée à la nature sableuse de la zone non saturée et du sol.

- **Caractérisation de la vulnérabilité selon la méthode GOD**

La carte des indices de vulnérabilité donne des valeurs qui oscillent entre 0,44 à 0,544.

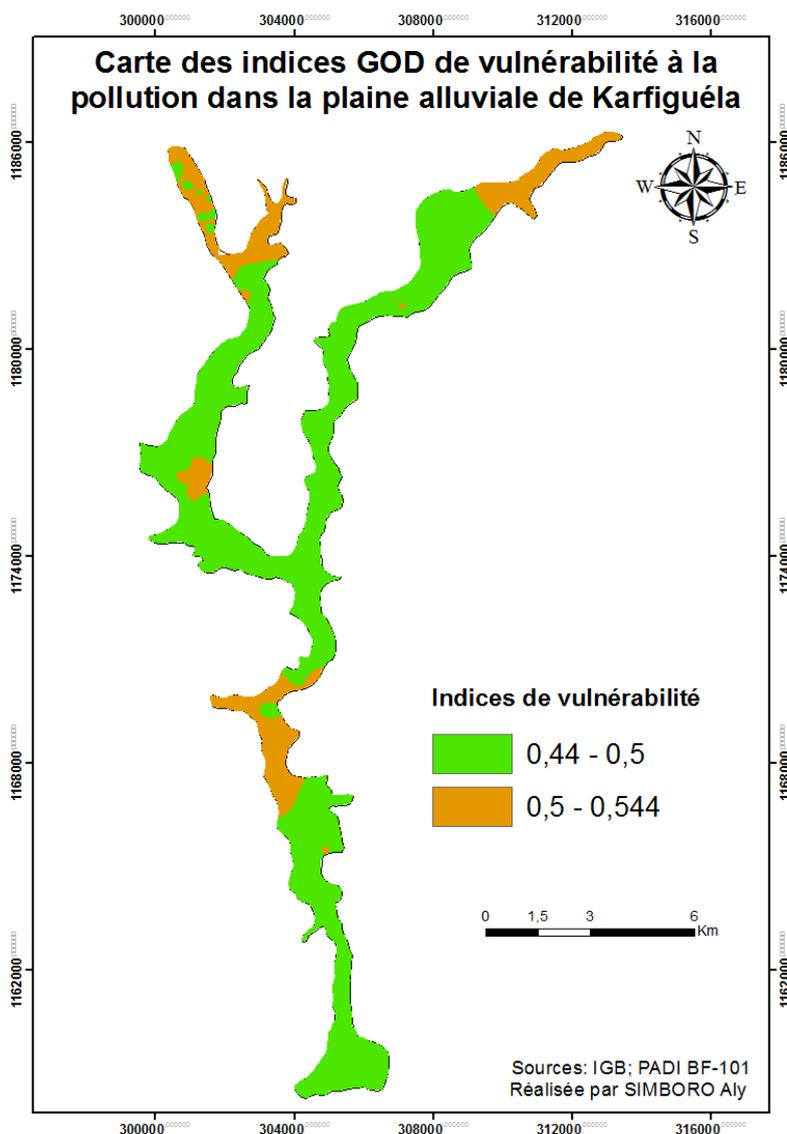


Figure 23 : Carte des indices GOD de la plaine alluviale de Karfiguéla

Une classification de ces indices a permis d'établir la carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD (Figure 24). L'analyse de cette carte révèle deux (2) classes de vulnérabilité réparties comme suit :

Classe **Moyenne** : la plus importante selon la méthode GOD, car elle s'étend sur presque toute la zone d'étude (78,32%). Elle garantit une pollution moins sévère dans le cas d'une contamination. Ce degré de vulnérabilité moyen, peut être lié à la nature de la zone non saturée constituée d'argile qui est peu perméable.

Classe **Forte** : cette classe occupe une partie du Nord et du Centre de la nappe de Karfiguéla. Elle représente une proportion moins importante que la classe précédente soit 21,68%. Le

degré fort de vulnérabilité peut toujours s'expliquer par la nature de la zone non saturée constituée de sable argileux ou sable.

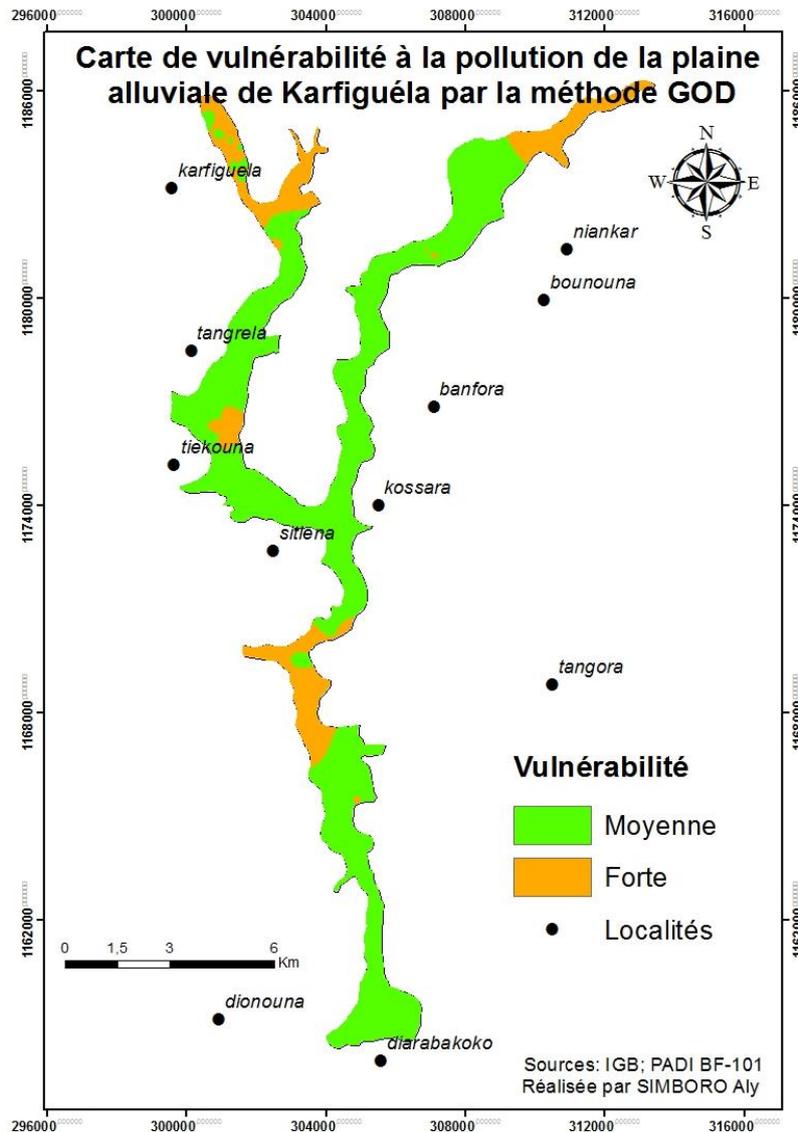


Figure 24 : Carte de vulnérabilité GOD de la plaine alluviale de Karfiguéla

- Caractérisation de la vulnérabilité selon la méthode SI**

Pour la méthode SI, la carte des indices de vulnérabilité spécifique donne des valeurs qui varient entre 40 et 78.

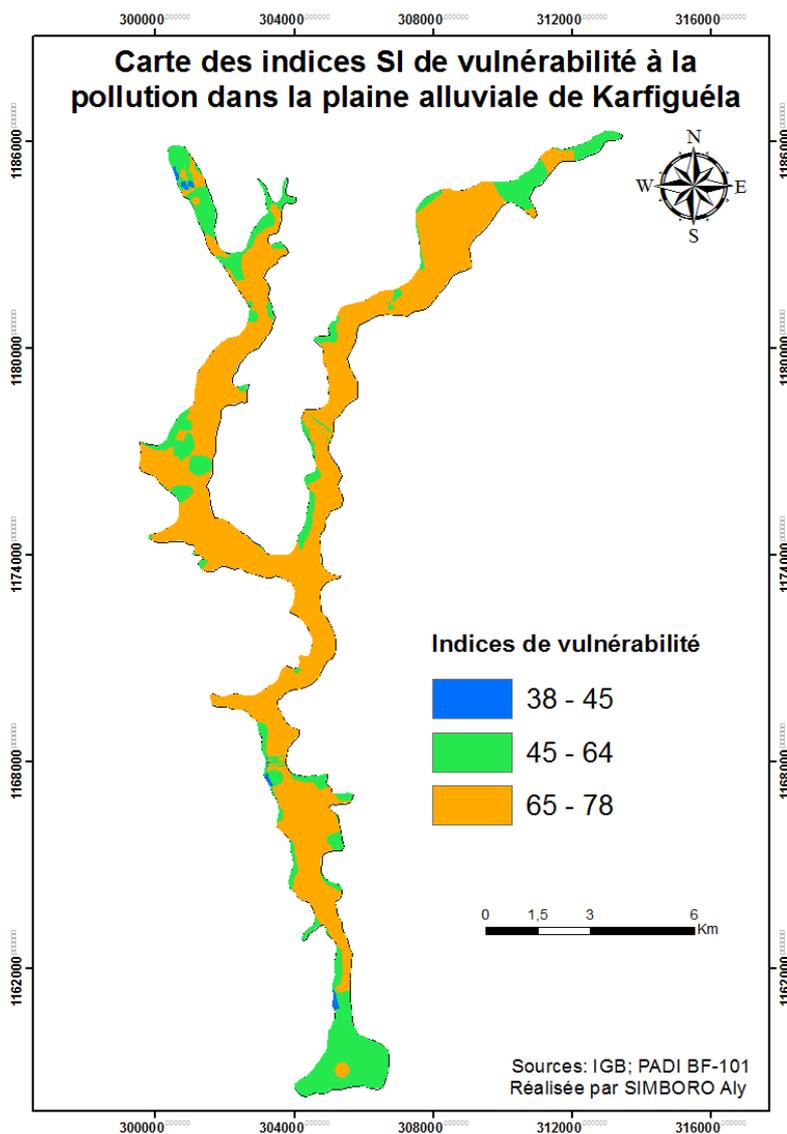


Figure 25 : Carte des indices SI de la plaine alluviale de Karfiguéla

La classification de ces indices a permis d'établir la carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode SI (Figure 26). L'analyse de cette carte met en évidence trois classes de vulnérabilité réparties comme suit :

Classe **Faible** : caractérise un degré moindre de vulnérabilité à la pollution. Elle ne représente que 0,42% et occupe quelques espaces aux extrémités de la plaine. Ces zones sont principalement des zones forestières (pas de polluant agricole) d'où le faible indice de vulnérabilité spécifique.

Classe **Moyenne** : assez importante avec 21,28%, elle occupe les bords la plaine. Elle garantit une pollution moins sévère dans le cas d'une contamination. Ce degré de vulnérabilité moyen, peut être lié à la nature de la zone non saturée constituée d'argile qui est peu perméable.

Classe **Forte** : C'est la classe dominante de la zone d'étude sur 78,3% Le degré fort de vulnérabilité peut toujours s'expliquer par le fait que ces zones sont fortement agricoles donc avec probable utilisation de polluant d'origine agricole.

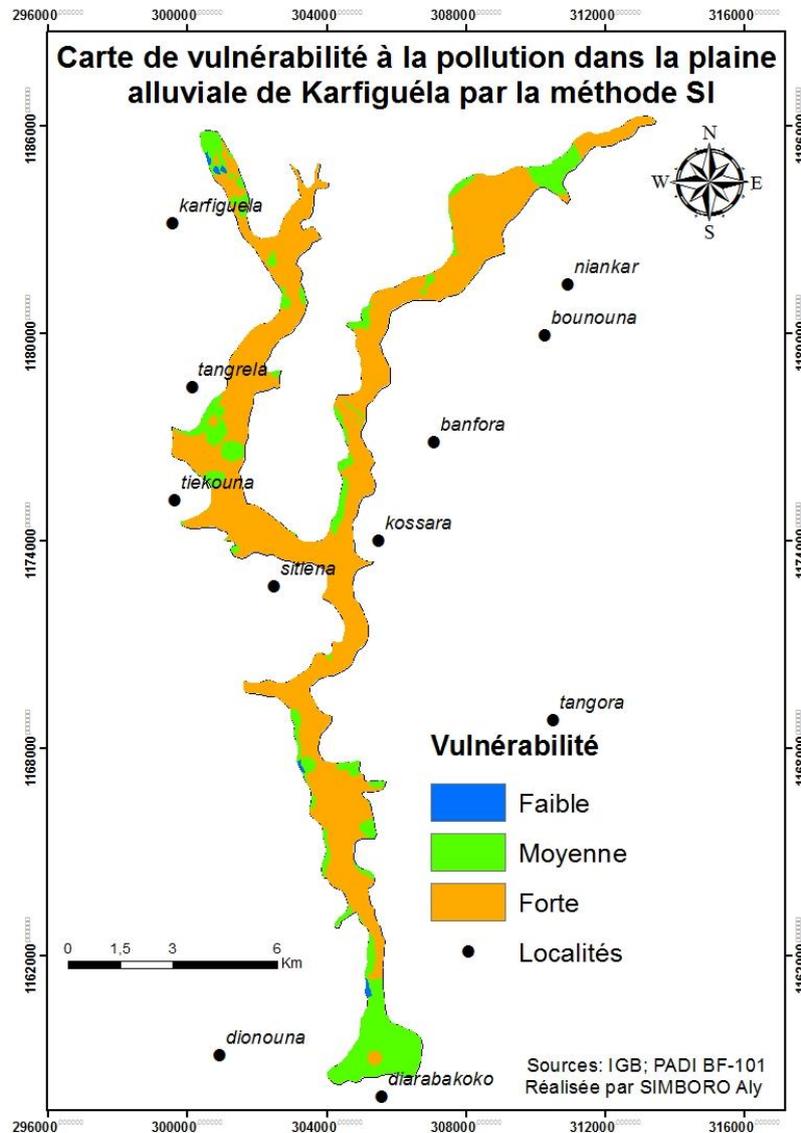


Figure 26 : Carte de vulnérabilité SI de la plaine alluviale de Karfiguéla

III.2.3. Analyse comparative des résultats:

Le tableau suivant donne les pourcentages de surface occupée par chaque classe

Classe de vulnérabilité	Pourcentage de surface par classe et par méthode (%)		
	DRASTIC	GOD	SI
Très faible (0)	0	0	0
Faible (1)	8,90	0	0,42
Moyenne (2)	90,60	78,32	21,28
Forte (3)	0,50	21,68	78,30
Très forte (4)	0	0	0

Tableau 19 : Pourcentage des surfaces selon le degré de vulnérabilité

Il ressort que les méthodes DRASTIC, GOD présentent une vulnérabilité concentrée sur la classe «moyenne» respectivement 90,60% et 78,32% ; mais la méthode SI est plus concentrée sur la classe « forte » avec 78,3%. Le tableau 19 révèle aussi que la classe « faible » est peu représentée par les méthodes DRASTIC (8,9%) et SI (0,42%). Il s'en suit que les méthodes DRASTIC et GOD ont tendance à minimiser la vulnérabilité.

Les résultats du croisement (soustraction entre les indices de vulnérabilité) des cartes de vulnérabilité deux à deux sont résumés dans le tableau 20

Différence d'indice	Pourcentage de surface des différences d'indice		
	DRASTIC – GOD	DRASTIC -SI	GOD-SI
-1	30,09	86,58	61,57
0	69,91	13,13	33,17
1	0	0,29	5,16
2	0	0	0,11

Tableau 20 : Pourcentage des surfaces selon la différence d'indice

- Les méthodes DRASTIC et GOD présentent un équilibre sur les 69,91% de la zone d'étude car les indices de vulnérabilité sont identiques sur ces zones. Il y'a cependant quelques variations d'indices notamment une sous-évaluation (30,09%) de la méthode DRASTIC par rapport à la méthode GOD. Les deux cartes de vulnérabilité sont donc presque semblables car ces deux méthodes n'utilisent que des paramètres intrinsèques. En se référant aux cartes d'indices de vulnérabilité des deux méthodes, on remarque une concordance des deux cartes : les zones de grandes valeurs d'indices et de faibles valeurs d'indices coïncident pour les deux méthodes.

- La méthode SI surévalue d'une manière générale la vulnérabilité à la pollution de 86,58% par rapport à la méthode DRASTIC. Cela vient du fait que SI fait intervenir le paramètre externe : l'occupation des sols
- Dans l'ensemble la méthode SI a tendance à surévaluer la vulnérabilité à la pollution par rapport à la méthode GOD (61,57%). Cette surévaluation de la vulnérabilité de la pollution par la méthode SI est toujours liée à la prise en compte du paramètre occupation des sols.

III.2.4. Etude du risque de pollution

Pour déterminer les zones à risques dans la plaine alluviale, nous avons superposé une carte de vulnérabilité intrinsèque avec les différentes sources de pollution représentées par la carte d'occupation des sols. La carte de vulnérabilité intrinsèque établie par la méthode GOD est utilisée pour l'évaluation du risque de pollution. Ce choix est justifié par le fait que des deux méthodes (DRASTIC, GOD) la méthode GOD est celle qui surestime la vulnérabilité avec une variabilité de classes de vulnérabilité.

Ainsi, la figure 27 montre que la plaine de Karfiguéla est occupée par une grande surface avec un risque de pollution fort à très fort. Les zones à grands risques coïncident, généralement, aux zones agricoles situées sur les sols perméables (sableux). Cependant de faibles risques sont localisés dans les zones non agricoles, à l'extrême Nord-Ouest et aux extrémités de la plaine. La nappe de Karfiguéla est globalement caractérisée par un degré de risque élevé.

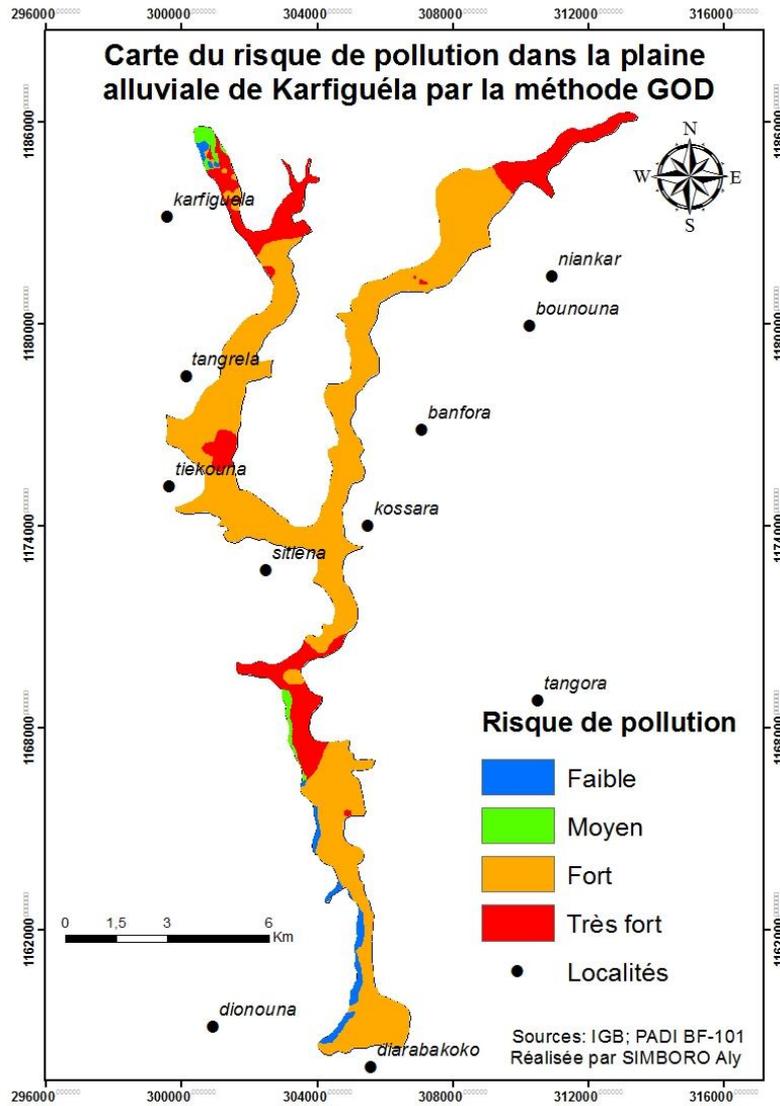


Figure 27 : Carte du risque de pollution de la plaine alluviale de Karfiguéla

IV. DISCUSSIONS

La complexité dans la réalisation des cartes de recharge induite ou de vulnérabilité à la pollution réside dans le nombre de facteurs hydrogéologiques à prendre en compte. Plusieurs paramètres comme la conductivité hydraulique, la profondeur à la nappe, l'impact de la zone vadose, ont été produites par interpolation ce qui entraîne des erreurs dans la réalisation des paramètres (Kouamé, 2007).

Par ailleurs, l'une des difficultés de l'application des méthodes de cartographie de vulnérabilité est l'assignation des limites de classes et des cotes aux différents paramètres (Murat, 2000 in Kouamé, 2007). En effet, les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude car ces classes peuvent regrouper en leur sein des entités différentes (Lobo-Ferreira et al., 2003 in Feumba 2014).

En dépit des différentes limites soulevées dans l'établissement des cartes de vulnérabilité à la pollution par les méthodes intrinsèques, il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité intrinsèque est fiable. Kouamé a cité plusieurs travaux qui ont également abouti à une telle conclusion : Anani (2006), Fofana (2005), Murat et al., (2003) et Murat (2000). Elle permet d'avoir une idée sur les zones sensibles qu'il va falloir prendre en compte lors de l'aménagement du territoire.

L'étude de la vulnérabilité à la pollution par les méthodes DRASTIC, GOD et SI a permis de déceler trois classes de vulnérabilité faible, modérée, et forte. L'analyse des cartes de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine a révélé que le degré de vulnérabilité croît avec la perméabilité du sol et de la zone non saturée. Ces zones se situent aux endroits où il y a une présence de sable près de la surface. Les secteurs à faible vulnérabilité se trouvent au niveau des zones tampons, c'est à-dire là où l'argile est présente.

L'analyse des fréquences de surface des cartes de vulnérabilité révèle que les méthodes intrinsèques que sont DRASTIC et GOD ont un grand accord (69,91%) : elles présentent une dominance pour la classe de vulnérabilité moyenne. Mais la méthode GOD a tendance à surévaluer la vulnérabilité par rapport à DRASTIC. Pour la comparaison des méthodes intrinsèques avec la méthode SI, il ressort qu'il y a dans l'ensemble un faible accord entre SI et DRASTIC (13,13%), et entre SI et GOD (33,17%). Aussi d'une manière générale, la méthode SI a tendance à surévaluer la vulnérabilité par rapport aux deux autres méthodes.

Les cartes de vulnérabilité à la pollution ont pour but de montrer les grandes tendances de la vulnérabilité pour l'affectation d'activités à risque.

Les zones de recharge sont reconnaissables à une vulnérabilité plus forte. La méthode permet cependant de classer les secteurs en fonction du degré d'infiltration. Cela veut donc dire que, pour certains secteurs, l'attribution de cotes aurait pu être réalisée de manière plus précise. Comme on l'a mentionné plus haut, étant donné la variabilité des paramètres utilisés par les deux méthodes, on s'attendrait à ce que les cartes de vulnérabilité mettent en évidence les zones de recharge. Si on compare les deux méthodes, on remarque que la méthode GOD permet d'obtenir une variabilité dans la représentation de la vulnérabilité (Figure 24). La classification des intervalles d'indices de vulnérabilité selon Aller et al. 1987, semble ne pas être appropriée, il faut donc penser à une classification relative et adaptée aux conditions géologiques et hydrogéologiques de la zone étudiée

Les cartes obtenues sont des outils d'aide à la décision. Comme dans tout autre produit résultant de la manipulation ou traitement de jeux de données, ces cartes peuvent contenir des erreurs dont la source provient depuis l'acquisition de données, en passant par leur traitement ou du fait d'une couverture spatiale assez limitée des données. Pour une éventuelle exploitation de telles cartes, il est donc important que l'information sur les données, leur mode de traitement et la qualité des données soient rendus disponibles. Dans tous les cas, ces méthodes de vulnérabilités intrinsèques permettent de se faire une idée assez précise sur les zones sensibles d'une région donnée en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

V. CONCLUSION

Ce travail de fin d'étude est une contribution pour une meilleure gestion des ressources en eau dans la plaine alluviale de Karfiguéla à travers une étude de la recharge induite de la nappe et de sa vulnérabilité à la pollution. Pour ce faire, nous avons utilisé un Système d'Information Géographique (SIG) avec des données de plusieurs domaines (géologie, hydrogéologie, hydrologie, sociologie...). En effet, l'intégration et le traitement de données multiples dans l'environnement ArcGIS facilitent l'analyse spatiale et l'interprétation des phénomènes naturels.

Les principaux apports de ce mémoire sont de deux (2) ordres :

L'évaluation de la recharge induite de la nappe alluviale de Karfiguéla

La recharge induite est considérée comme une solution à plusieurs problèmes d'alimentation et de gestion des ressources en eau et cela passe par l'identification et la caractérisation des sites potentiels de recharge. La superposition des différentes couches d'informations à l'aide du SIG a permis de proposer des zones de recharge induite.

Les zones caractérisées par des formations sableuses sont les plus perméables et donc les plus favorables à l'infiltration.

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine alluviale de Karfiguéla selon différentes méthodes

C'est un moyen d'aide à la prévision d'éventuelle pollution des eaux souterraines. Elle a permis de dresser le portrait de la défense naturelle de l'aquifère de Karfiguéla contre les pollutions à partir des méthodes DRASTIC, GOD et SI. Elle a également permis de faire la comparaison entre ces différentes méthodes. L'objectif a donc été atteint. De cette étude il ressort que les méthodes intrinsèques, surtout la méthode GOD, fournissent de meilleurs résultats d'évaluation de la vulnérabilité par rapport à la méthode SI. Leur application sur la plaine de Karfiguéla a montré que la nappe est vulnérable à pollution dans son ensemble. Cette vulnérabilité est accentuée au niveau des zones sableuse qui ont une forte vulnérabilité à la pollution et présentent un risque très élevé de pollution du fait des pratiques agricoles. Ces zones de forte vulnérabilité représente 21,58 % du bassin. Quant à la carte de vulnérabilité à la pollution d'origine agricole établie par la méthode SI, elle surévalue la vulnérabilité à la pollution de la plaine alluviale de Karfiguéla avec 78,30% de zones fortement vulnérables.

Les zones les plus favorables à la recharge sont aussi les plus vulnérables. Il apparaît donc nécessaire d'entreprendre des mesures de gestion des ressources en eau dans la plaine alluviale de Karfiguéla.

Cette expérience a montré que les SIG sont d'un apport majeur sur plusieurs plans. L'automatisation, l'analyse, la rapidité de manipulation et la mise en mémoire des données avec capacité de réactualisation ont donné pleine satisfaction.

VI. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Dans la plaine alluviale de Karfiguéla les eaux de surface constituent la principale ressource pour l'agriculture irriguée, cependant on assiste à une augmentation de l'exploitation des eaux souterraines. Aussi la nappe de Karfiguéla est libre, dépourvue de tout type de recouvrement imperméable, elle est propice à la pollution percolant de la surface. De ce fait des mesures, visant à assurer la qualité et la quantité des eaux de la nappe, doivent être instaurées dans le cadre d'une gestion des ressources en eau:

Cette gestion nécessite la disponibilité de données fiables qui permettront une évaluation fine et adéquate des différents paramètres. En plus, l'implication directe des populations est indispensable, pour une meilleure application. C'est pourquoi nous préconisons :

- Renforcer le réseau de suivi des ressources en eau avec plus de piézomètres dans la plaine et même hors de la plaine.
- Réaliser des essais de pompages pour déterminer les paramètres hydrodynamiques, en particulier le coefficient d'emménagement, qui sont indispensables pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des aquifères.
- Caractériser au mieux les sols et réaliser des mesures d'infiltrométrie.
- Améliorer la recharge avec des ouvrages tels que les bassins d'infiltration, les checks dans ou les digues d'épandage au niveau des zones favorables à la recharge. Ces ouvrages, le plus souvent construits avec des matériaux locaux, peuvent être permanents ou temporaires, fonctionner continuellement ou par intermittence, être placés dans le lit du cours d'eau ou à proximité.
- Renforcer le suivi de la qualité des eaux, surtout dans les zones à forte vulnérabilité, cela permettra de détecter toute pollution à temps, et de prendre des mesures conséquentes;
- Mettre en place une base de données (et son actualisation fréquente) sur les sources de pollution, à travers le type et la quantité des intrants agricoles, pour mieux suivre l'évolution du risque. Les intrants agricoles et les pesticides sont des sources de pollution. Ceci permettra de soumettre à des restrictions d'usage ceux qui, d'une manière générale, contaminent fréquemment les milieux aquatiques (rivières ou eaux souterraines), afin de limiter leur impact.
- Mettre en place des périmètres de protection autour des captages se trouvant dans les zones de forte vulnérabilité. Cette procédure constitue un moyen de prévention face aux pollutions ponctuelles ou accidentelles et cela à travers trois types de périmètres :

le périmètre de protection immédiate (zone très limitée autour du captage, exclusivement destinée aux activités liées au prélèvement de l'eau) ; le périmètre de protection rapprochée (à l'intérieur duquel les installations et les activités pourront être réglementées ou interdites) ; le périmètre de protection éloignée (non obligatoire, à l'intérieur duquel les installations et activités pourront être réglementées sans toutefois y être interdites)

- Vérifier la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines (porté sur l'analyse du taux de nitrates). Cette validation des cartes de vulnérabilité établies pourrait être plus représentative avec un nombre plus important de mesures de nitrates bien réparties sur toute la plaine, ce qui nécessiterait une nouvelle campagne de mesures des eaux de la nappe.
- Elaborer un plan de gestion concerté : Sensibiliser les agriculteurs dans le cadre d'une gestion intégrée de la ressource en eau souterraine et de l'environnement dans les zone concernée aboutissant à un aménagement autour des sources (Zone agricole, espaces à utilisation contrôlée, espaces à exploitation interdite et l'implication des acteurs) : Sensibiliser les populations à l'utilisation rationnelle des engrais et intrants agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

ALLER L., BENNETT T., LEHR J.H., PETTY R. J. et HACKETT G. (1987). DRASTIC: A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA, Ada, Oklahoma, 622 p.

BETAN Noël (2014), Caractérisation de l'hydrodynamisme de la plaine alluviale de Karfiguéla, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

BIEUPOUDE Pascal (2008), Mapping groundwater intrinsic vulnerability using a new physically based modeling in Kou basin.

DAO Djamilatou (2015); Taux d'exploitation et durabilité de la ressource en eau des aquifères alluviaux du Kou et de Karfiguéla, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

FEUMBA Roger (2015) ; Hydrogéologie et évaluation de la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke (Douala, Cameroun) Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I

FOFANA Yacouba (2014), Caractérisation hydrogéologique et vulnérabilité des sources de Nasso et de Pessô à la pollution d'origine agricole, mémoire de master, ENI

GOMBERT Philippe (1998), Synthèse sur la Géologie et l'hydrogéologie de la série sédimentaire du sud-ouest du Burkina Faso,

HALADOU Laouali (2013), Caractérisation des matériaux et de la puissance de la plaine alluviale de Karfiguéla par des investigations géophysiques, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

KHEMIRI S., KHNISSI A., ALAYA1 M. B., SAIDI S. et ZARGOUNI F.(2013) Using GIS for the Comparison of Intrinsic Parametric Methods Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in Scenarios of Semi-Arid Climate. The Case of Foussana Groundwater in the Central of Tunisia; *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, 5, 835-845

KOUAME Kan Jean (2007), Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution Thèse de doctorat, Université de Cocody

MURAT V., MARTEL R., MICHAUD Y. et THERRIEN R. (2000). Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont LAURENTIEN, Québec, AIHCNC et SCG, pp. 411-418.

NDIAYE Dame (2008) Description et évaluation de la réalimentation des aquifères de la région de Bobo Dioulasso par les précipitations météorologiques, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

NDJOMO TSIMI Pierrick (2015) Modélisation mathématique appliquée à l'hydrogéologie : Modélisation numérique du comportement hydrodynamique de l'aquifère alluvial de Karfiguéla, mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

RAVI S. M. N. and MOHAN G. A GIS based hydrogeomorphic approach for identification of site-specific artificial-recharge techniques in the Deccan Volcanic Province. *J. EarthSyst. Sci.* 114, No. 5, October 2005, pp. 505–514

SAINT-PE Max A. Alimentation artificielle des nappes *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, XVI, 2. 6/1971

SARAVANAN Identification of Artificial Recharge Sites in a Hard Rock Terrain using Remote Sensing and GIS, *International Journal of Earth Sciences and Engineering* ISSN 0974-5904, Vol. 05, No. 06, December 2012, pp. 1590-1598

SMIDA H., MAIZA N., ZAIRI M. et BEN DHIA H. Gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux dans la région de Sidi Bouzid (Tunisie centrale) à l'aide d'un SIG : Etude de la recharge induite des nappes et leur vulnérabilité à la pollution, ESRI France 2015

SMIDA H., ZAIRI M., TRABELSI R. et BEN DHIA H. Identification de zones de recharge induite d'aquifères à l'aide d'un Système d'information géographique : cas de la nappe de Chaffar (Sud-Est tunisien). *Sécheresse* 2006 ; 17 (3) : 433-42

YANOGO Florence Noaga (2008), Etude de la vulnérabilité à la pollution des aquifères du bassin versant du Kou dans le Sud Ouest du Burkina, mémoire de master, ENI

Sites internet

<http://www.esrifrance.fr/sig2008/DRASTIC.htm>, consulté le 21 Aout 2015

<file:///sigenis.htm>, consulté le 7 Septembre 2015

<http://www.toupie.org/Dictionnaire/Vulnerabilite.htm>, consulté 13 Aout 2015

ANNEXES

Annexe 1 : Données piézométriques observées 2014

Micro piézomètres	longitudes (UTM)	latitudes (UTM)	Z_DGPS (m)	NS (m)	NP (m)
PzRd1	311882	1185511	282,423	1,42	281,00
PzRg1	303433	1167480	261,851	1,61	260,24
PzRd2	310800	1185026	286,39	0,45	285,94
PzRg2	305107	1166189	255,454	3	252,45
PzRd3	303530	1166951	261,722	2,99	258,73
PzRg3	305266	1165804	257,759	3,1	254,66
PzRd4	305116	1165642	256,895	1,24	255,65
PzRg4	305548	1158702	262,8	0,7	262,1
PzRd5	304917	1165493	258,04	1,81	256,23
PzRg5	305425	1158951	262,679	2,2	260,479
PzRd6	304635	1165085	257,679	1,32	256,359
PzRd7	305508	1158610	260,651	0,63	260,021
PzRd8	305076	1166100	256,103	2,22	253,883
PzRg 6	301389	1177844	277,611	1,6	276,011
PzRg 7	301400	1177708	278,075	0,8	277,275
PzRg 8	301255	1177190	275,921	1,09	274,831
PzRg 9	301151	1176656	273,15	2,2	270,95
PzRg 10	301271	1175859	269,348	1,77	267,578
PzRd 9	301373	1175677	268,718	1,68	267,038
PzRd 10	300994	1175855	268,727	1,35	267,377
PzRd 11	300760	1175819	268,253	0,59	267,663
PzRd 12	300857	1176323	272,013	1,92	270,093
PzRd 13	300908	1176709	270,763	1,87	268,893
PzRd 14	301066	1177117	273,813	1,96	271,853
PzRd 15	300942	1177751	280,201	1,82	278,381
PzRd 16	300492	1185484	286,615	1,07	285,545
PzRd 17	300566	1185220	286,802	1,16	285,642
PzRd 18	300974	1184778	281,557	0,91	280,647
PzRd 19	300947	1184788	281,557	0,52	281,037
PzRg 11	300950	1185396	283,562	2,01	281,552
PzRg 12	301006	1185091	282,332	1,85	280,482
PzRg 13	301160	1184854	283,797	2,08	281,717
PzRg 14	301062	1184738	280,544	1,64	278,904
PzRg 15	301264	1184540	281,773	2,02	279,753
PzRg 16	301555	1184347	280,434	1,7	278,734
PzRg 17	301680	1183938	279,075	1,24	277,835
PzRd 20	301196	1184276	280	0	280

PzRd 21	301484	1184167	284,243	0	284,243
PzRd 22	301361	1183878	282,601	1,22	281,381
PzRd 23	301484	1183159	281,593	2,09	279,503
PzRd 24	301866	1182533	282,057	0,81	281,247
PzRd 25	302565	1181508	280,498	1,05	279,448
PzRd 26	302756	1181280	279,871	1,46	278,411
PzRd 27	302805	1180951	280,479	1,64	278,839
PzRg 18	301604	1183468	278,499	1,63	276,869
PzRg 19	301907	1182794	278,837	1,01	277,827
PzRg 20	302181	1182217	279,95	0	279,95
PzRg 21	302477	1182053	278,852	0,87	277,982
PzRg 22	303003	1181408	279,873	3,8	276,073
PzRd 28	304360	1172005	279	2,21	276,79
PzRd 29	304429	1170912	278,08	1,37	276,71
PzRd 30	304109	1170514	278,39	2,22	276,17
PzRd 31	307260	1181281	279	1,21	277,79
PzRd 32	306985	1181556	278,61	1,05	277,56
PzRd 33	306867	1181373	278,56	1,15	277,41
PzRd 34	306698	1181344	278,37	0,9	277,47
PzRd 35	306737	1181314	278,21	2	276,21
PzRg 23	304443	1171997	278,87	2,29	276,58
PzRg 24	303702	1169049	280,8	0,8	280
PzRg 25	303446	1169538	281,18	2,1	279,08
PzRg 26	303554	1169898	280,25	2,01	278,24
PzRg 27	304686	1170561	278,8	2,45	276,35
PzRg 28	304641	1170410	280,16	1,24	278,92
PzRg 29	307207	1181234	278,51	1,37	277,14
PzRg 30	307051	1181236	278,3	1,63	276,67
PzRg 31	306937	1181116	278,35	0,7	277,65
PzRg 32	306802	1181185	279	0,72	278,28
PzRg 33	306858	1181298	278,93	1,1	277,83
PzRg 34	303487	1169004	280,05	2,54	277,51

Annexe 2 : Valeurs de la conductivité hydraulique

Micro piézomètres	X	Y	K (m/s) Bouwer et Rice
PZRG12	302478	1182150	1,27E-04
PZRG11	302177	1182310	2,29E-04
PRG10	301901	1182887	1,33E-04
PZRG7	301677	1184033	1,58E-04
PZRG6	301555	1184446	9,53E-05
PZRG2	301003	1185188	4,31E-04
PZRG5	301264	1184637	1,37E-05
PZRG4	301061	1184834	3,04E-05
PZRG13	303009	1181507	3,06E-05
PZRG9	301599	1183566	5,63E-05
PZRG3	301159	1184954	5,51E-06
PZRD4	300941	1184869	3,60E-05
PZRD3	300972	1184870	4,78E-07
PZRD2	300561	1185318	1,05E-06
PZRD8	301357	1183974	3,21E-06
PZRD9	301483	1183256	3,22E-05
PZRD10	301868	1182634	7,55E-07
PZRD11	302562	1181607	1,83E-05
PZRD12	302754	1181375	1,68E-05
PZRG1	300955	1185489	5,26E-08
PZRD13	302805	1181048	3,44E-05
PZRGX5	305425	1159044	1,06E-05
PZRGX4	305547	1158791	6,14E-07
PZRDX7	305507	1158704	2,39E-07
PZRG A	301386	1177939	9,74E-09
PZRG B	301402	1177804	2,27E-05
PZRG D	301252	1177283	6,24E-05
PZRG E	301149	1176748	1,90E-05
PZRG F	301271	1175955	1,30E-05
PZRDA	301370	1175768	4,31E-05
PZRDB	300987	1175943	1,22E-05
PZRDC	300755	1175913	1,50E-05
PZRDD	300854	1176414	1,93E-05
PZRDE	300904	1176803	1,74E-06
PZRDF	301065	1177212	3,32E-05
PZRDG	300938	1177842	2,16E-05
PZRDX2	311883	1185605	9,80E-06
PZRDX1	310797	1185120	3,75E-05
PZRGX3	305260	1165898	3,84E-08
PZRGX2	305101	1166284	1,84E-05
PZRDX8	305076	1166196	9,20E-08

PZRDX4	305112	1165738	6,83E-06
PZRDX5	304913	1165585	1,66E-05
PZRDX6	304632	1165179	7,37E-06
PZRDX3	303527	1167046	1,67E-05
PZRGX1	303433	1167570	5,67E-06

Annexe 3 : Quelques coupes lithologiques de piézomètres.

