



ZiE
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

*CONTRIBUTION A LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU (GIRE) DANS LA
REGION DE MARADI/NIGER : UTILISATION DES OUTILS SIG POUR LA
CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE ET DE LA SENSIBILITE A LA POLLUTION
DES NAPPES D'EAU*

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
SPECIALISE EN GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU**

Présenté et soutenu publiquement le 28 Septembre 2010

par

Moussa IBRAHIM

**Travaux dirigés par : Mamane BAKO, Ingénieur Hydraulicien
MEE/LCD/DRE/SIGNER-Niger**

**Corentin SOME, Enseignant Chercheur, Dr.
UTER-GVEA**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Corentin SOME

**Membres et correcteurs : Dr. Mariam SOU
Mr. Yacouba KONATE**

Promotion [2009/2010]

Sommaire

RESUME.....	vii
SUMMARY.....	viii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	ix
LISTE DES CARTES.....	x
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ANNEXES.....	xi
I INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.1 contexte d'étude.....	3
I.2 Présentation générale de la région.....	3
I.3 Le milieu biophysique.....	4
I.3.1. Le relief et la topographie.....	4
I.3.2. Le climat.....	5
I.3.3. Les ressources forestières et fauniques.....	6
I.3.4 La géologie.....	7
I.3.5Le réseau hydrographique.....	7
I.3.6 Les ressources en eau Souterraine.....	8
I.3.7 Les ressources en sol.....	10
I.4 le milieu humain et économique.....	10
I.4.1 La situation démographique.....	10
I.4.2 Activités agro-Sylvo pastorales.....	11
I.4.3 Commerce.....	11
I.5 Qualité de l'eau et contamination de la ressource.....	11
I.5.1 Qualité de l'eau/Pollution.....	12
I.5.2 Source de pollution.....	12

I.6 Notion de vulnérabilité/Sensibilité	13
II JUSTIFICATION ET OBJECTIFS DE TRAVAIL.....	14
II.1 Justification de travail.....	14
II.2 Objectifs du travail	16
II.2.1 Objectif global	16
II.2.2 Objectifs spécifiques.....	16
III MATERIEL ET METHODES	17
III.1 Données et matériel utilisés.....	17
III. 1.1 Données	17
III.1.2 Matériel	17
III.2 Méthodologie de travail	18
III.2.1 Phase préparatoire de l'étude	18
III.2.2 Phase de travail à l'IRH-SIGNER.....	19
III.1.2.1 Démarche d'évaluation de la vulnérabilité de la nappe	19
III.1.2.2 Démarche d'évaluation de la sensibilité de la nappe	25
III.1.2.3 Validation des cartes de vulnérabilité	27
IV RESULTATS.....	29
IV.1 Caractérisation physico-chimique des eaux des nappes de la région de maradi.....	29
IV.1.1 L'évolution dans l'espace et dans le temps de la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale.....	29
IV.1.2 L'évolution dans l'espace et dans le temps de la pollution des eaux souterraines de la nappe du Continental Hamadien (CH) et du socle	30
IV.2 Caractérisation de la vulnérabilité des nappes de Maradi selon la méthode DRASTIC	32
IV.3 Caractérisation de la vulnérabilité des nappes de Maradi selon la méthode GOD	34
IV.4 Analyse comparative des résultats des deux méthodes utilisées.....	36
IV.4.1 Superficie des différentes zones de vulnérabilité.....	36
IV.4.2 Distribution des degrés de vulnérabilité à la pollution.....	36

IV.5 Validation des cartes de vulnérabilité à la pollution	37
V DISCUSSION ET ANALYSES.....	41
VI CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	44
VII RECOMMANDATIONS.....	46
VIII BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXES.....	51

DEDICACES

Ce travail est dédié à :

- *Mon cher papa, Monsieur IBRAHIM MAHAMANE, qui a toujours cru en moi et a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études.*
- *Ma chère mère, SARATOU HASSAN, que je ne cesse de remercier pour tout ce qu'elle m'a donné. Elle m'a supporté 9 mois dans son ventre et a fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui. Que Dieu la récompense pour tous ces bienfaits.*

IBRAHIM MOUSSA

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, le Tout Puissant, le Miséricordieux, qui nous a donné l'opportunité de mener à bien ce travail.

C'est avec un grand plaisir que, j'adresse mes sincères remerciements à l'égard de mes encadreurs, Monsieur BAKO Mamane, SOME Correntin et RABE Sanoussi, qui n'ont ménagé aucun effort pour la bonne réussite de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements au Directeur des Ressources en Eau du MEE/LCD GARBA Radji, à Monsieur IBRAHIM Andillo Directeur Régional de l'Hydraulique de Maradi, à l'équipe locale de la cellule IRH-SIGNER Niger, à l'équipe de la DRE/MEE/LCD Niger, à tous les personnels de la Direction Régionale de l'Hydraulique Maradi Niger pour leur accueil chaleureux et leurs orientations pour le bon déroulement de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury de la commission de suivi de ce travail notamment Dr. Corentin SOME, Dr. Mariam SOU et Ing. Yacouba KONATE qui ont su l'apprécier. La pertinence de leurs critiques et suggestions nous a permis d'être à la hauteur de ce travail.

Je réserve une pensée spéciale à tous les enseignants de GIRE qui ont su nous donner une formation didactique et appréciable durant tout notre cursus, à la promotion GIRE 2009/2010 pour la sagesse qu'elle a fait preuve. Ce geste sera gravé à jamais dans nos mémoires.

Je ne terminerai pas sans avoir exprimé des remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

RESUME

Cette étude fait état de l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères régionaux dans le cadre du projet de caractérisation du système aquifère de la région de Maradi en République du Niger. L'étude de la vulnérabilité consiste à évaluer la sensibilité de la ressource à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol en se basant sur les propriétés physiques du milieu. Deux méthodes, DRASTIC et GOD, ont été appliquées afin d'être comparées. Les résultats obtenus montrent une évaluation plus fine avec la méthode DRASTIC. Celle-ci montre que les zones à forte vulnérabilité apparaissent au niveau des zones de recharge, soit dans la parties sud, sud-ouest et nord de la région étudiée, alors que les zones à plus faible vulnérabilité sont situées dans les secteurs où l'épaisseur d'argile est importante. Avec la méthode GOD, la région à l'étude apparaît dans l'ensemble à vulnérabilité modérée, ce qui n'est pas représentatif du territoire.

Mots Clés:

- 1** –Vulnérabilité,
- 2** - Pollution
- 3** - DRASTIC
- 4** - GOD
- 5** - Région de Maradi

SUMMARY

This study presents an assessment of the vulnerability of regional aquifers as part of the geological survey of Niger Republic project of characterization of system aquifer in region of Maradi. Vulnerability assessment uses the physical properties of the setting to evaluate the sensitivity of ground-water to all types of pollutants introduced from the ground surface. Two methods, DRASTIC and GOD, were used for comparison purposes. Results indicate that the DRASTIC method yields a more detailed assessment. This method shows the higher vulnerability areas as coinciding with recharge zones in the northern, northwestern and southeastern parts of the study area, with the lower vulnerability areas located where clay cover is significant. When the GOD method is used, the entire study area appears to have moderate vulnerability, which is not an adequate representation of the region.

Key words:

- 1 - Vulnerability**
- 2 - Pollution**
- 3 - DRASTIC**
- 4 - GOD**
- 5 – Region of Maradi**

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ANDDH : l'Association Nigérienne de Défense des Droits de l'Homme

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

DAES : Direction des Affaires Economiques et Sociales

DCE : Directive Cadre Européenne sur l'eau

DRE : Direction des Ressources en Eau

DRH/Mdi : Direction Régionale de l'Hydraulique de Maradi

DRH : Directeur Régional de l'Hydraulique

CH : Continental Hamadien

CNEA : Commission Nationale de l'Eau et de l'Assainissement

CREA : Commission Régionale de l'Eau et de l'Assainissement

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

GWP : Global Water Partnership

ID : Indice DRASTIC

IG : INDICE GOD

IRH-SIGNER : Inventaire des Ressources Hydrauliques – Système d'Information Géographique du Niger

MEE/LD : Ministère de l'Eau de l'Environnement et de la Lutte contre la Désertification

OMD : Objectifs du Millénaire pour le Développement

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PANGIRE : Plan d'Actions Nationales sur la GIRE

PEM : Points d'Eau Modernes

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

SEEN : Société d'Exploitation des Eaux du Niger

SIG : Système d'Information Géographique

TDR : Terme De Référence

UAG/PNEDD : l'Unité d'Appui a la Gestion du Plan National de l'Environnement pour un Développement Durable

UGE : Unité de Gestion de l'Eau

WHO : World Health Organization

2iE : Institut international d'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement

LISTE DES CARTES

Carte n 1: Localisation de la région de Maradi	4
Carte n 2: Situation du réseau hydrographique	8
Carte n 3: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi selon la méthode DRASTIC.....	33
Carte n 4: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi selon la méthode GOD	35
Carte n 5: Carte de la répartition spatiale de la concentration en nitrates en 2008	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Evolution de la pluviométrie dans la région.....	6
Figure 2: Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC.....	22
Figure 3: Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode GOD	25
Figure 4: Variation spatiale des valeurs de la conductivité électrique en zone alluviale campagne Nov.2006.....	30
Figure 5: Variation temporelle des valeurs de la conductivité électrique en zone alluviale de Nov.2006 à Mai 2010.....	30
Figure 6: Variation spatiale des valeurs de la conductivité électrique en zone Continental Hamadien et campagne Nov.2006	31
Figure 7: Variation temporelle des valeurs de la conductivité électrique en Zone Continental Hamadien de 2006 à 2008.....	31
Figure 9: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution de la région de Maradi selon GOD	36
Figure 8: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution de la région de Maradi selon DRASTIC.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : données pluviométriques de la région de Maradi (1996 – 2009).....	5
Tableau 2 : Paramètres hydrogéologiques DRASTIC avec leurs poids respectifs (Sinan et al., 2007).....	20
Tableau 3 : Exemple de calcul de l'indice DRASTIC	21
Tableau 4 : Intervalles des valeurs des indices DRASTIC et classes correspondantes (Murat et al., 2003)	21
Tableau 5 : Cotes attribuées au paramètre « type d'aquifère » (Sinan et al., 2007)	23
Tableau 6 : Cotes attribuées au paramètre « lithologie de l'aquifère » (Sinan et al., 2007)	23
Tableau 7: Cotes attribuées au paramètre « profondeur de la nappe » (Sinan et al., 2007).....	24
Tableau 8: Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes correspondantes (Murat et al., 2003) 24	24
Tableau 9 : Notes de la vitesse de déplacement de l'eau souterraine	26
Tableau 10 : Notes de la Productivité de la nappe (Sinan et al., 2003)	26
Tableau 11 : Notes de la Qualité de l'eau (Sinan et al., 2003).....	27
Tableau 12: Intervalles des valeurs de l'indice IS et classes correspondantes (Sinan et al., 2003) 27	27
Tableau 13: Superficie des différentes zones de vulnérabilité.....	36

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Carte des Unités de Gestion de l'Eau du Niger.....	52
Annexe 2: Carte géologique de la région de Maradi.....	53
Annexe 3: Carte de la Densité de la population Maradi	54
Annexe 4: Présentation de la structure d'accueille	55
Annexe 5: Carte de sensibilité à la pollution des nappes d'eaux souterraines de la région de Maradi	58

I INTRODUCTION GENERALE

L'accès à l'eau potable est essentiel à la vie humaine, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) le considère même comme un droit humain. Cependant, plus de 300 millions d'Africains n'ont pas accès à des services aussi fondamentaux que sont l'eau potable et l'assainissement (*WHO/UNICEF JMP, 2006*). Plusieurs organismes se sont donc penchés sur ce problème et proposent diverses stratégies pour en arriver à une gestion plus efficace des ressources en eau en accord avec les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Le nouvel objectif adopté pour tous les pays est le développement de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) et des plans d'efficacité relatifs à l'eau d'ici 2015. La GIRE se définit par le Partenariat Mondial de l'Eau (GWP, 2009) comme « *un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser de manière équitable le bien-être économique et social en résultant, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux* ».

Au Niger, Les eaux de surface, qui proviennent en quasi totalité du fleuve Niger et de ses affluents de la rive droite et gauche représentent environ 30 milliards de m³ par an dont moins de 1% est exploité. Par ailleurs, il faut également signaler que dans la majeure partie du pays, l'eau de surface facilement accessible provient de cours d'eau prenant généralement leur source dans les pays voisins.

Quant aux eaux souterraines, leurs écoulements annuels représentent 2,5 milliards de m³ alors que les ressources hydriques non renouvelables, estimées à quelque 2.000 milliards de m³, sont peu exploitées compte tenu de la profondeur des nappes, leur mobilisation nécessite des coûts très élevés (NER/94/002, 1999).

En effet, les eaux souterraines constituent la principale source des systèmes d'approvisionnement en eau des grandes villes africaines. Cependant, l'expansion accélérée des villes et la croissance de la population contribuent à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines. La protection et la préservation de ces ressources sont donc une nécessité de premier ordre, particulièrement dans les zones urbaines. Dans ces zones, l'utilisation excessive des engrais, des pesticides et les effluents des systèmes d'évacuation, fosses septiques, usines et polluants des déchets solides sont des sources principales de pollution des eaux souterraines.

De ce fait, l'accès à l'eau (hydraulique pastorale, hydraulique agricole, eau potable en milieu rural et quartiers péri-urbains) et la qualité de l'eau posent des problèmes complexes et non résolus. Des mécanismes de coordination et de gestion intégrée dédiés à la résolution de ces problèmes sont à un stade de préparation très avancé: GIRE - UGE - CNEA – CREA - PANGIRE.

Au regard de cette situation, le Gouvernement a, depuis 1999, entrepris une série de réformes dans le domaine de l'eau avec pour objectif la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Les actions menées devraient permettre au Niger de se doter d'outils institutionnels, réglementaires, techniques et financiers en vue de la GIRE. Il s'agit, notamment de passer d'une approche sectorielle et centralisée de l'eau, à une approche intégrée, participative et décentralisée au niveau des bassins versants et les unités hydrogéologiques dont le territoire national a été subdivisé en sept (7) unités homogènes ou Unités de Gestion de l'Eau (UGE); avec la zone d'étude qui appartient à l'unité Goulbi - Tarka (illustration annexe 1). Les actions engagées ont consisté en l'expérimentation de la GIRE au niveau de l'unité pilote (Fleuve Niger/Liptako Gourma). Cette expérimentation, démarrée en 1998, a été conduite par l'Unité d'Appui à la Gestion du Plan National de l'Environnement pour un Développement Durable (UAG/PNEDD), avec l'appui financier du Programme de Nations Unies pour le Développement (PNUD). Cette expérimentation a permis d'initier le processus de la GIRE en République du Niger.

L'utilisation des eaux souterraines pour alimenter la population se développe très rapidement et il faudra s'assurer du maintien de sa disponibilité et de sa qualité. Comment concilier développement économique, aménagement du territoire et gestion durable des ressources en eau ? La question est réactualisée à l'occasion de chaque projet d'aménagement urbain, touristique, portuaire, industriel, etc. Il faut donc développer des outils d'aide à la décision pour gérer la ressource, afin de préserver à la fois la quantité et la qualité de cette ressource. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude dont le sujet a été défini en collaboration avec la Direction des Ressources en Eau du Ministère de l'Eau, de l'Environnement et de la Lutte Contre la Désertification.

La présente étude, qui a pour thème « *Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) dans la Région de Maradi/NIGER : Utilisation des outils SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau* »

souterraine » vise à analyser la contribution de la mise en applications des différents outils du système d'information géographique (SIG) dans la GIRE des différentes nappes d'eau souterraines dans l'espace régional de Maradi. Le travail sera structuré en cinq grands points à savoir l'introduction, la revue bibliographique, la méthodologie, le résultat -discussion et la conclusion.

I.1 CONTEXTE D'ETUDE

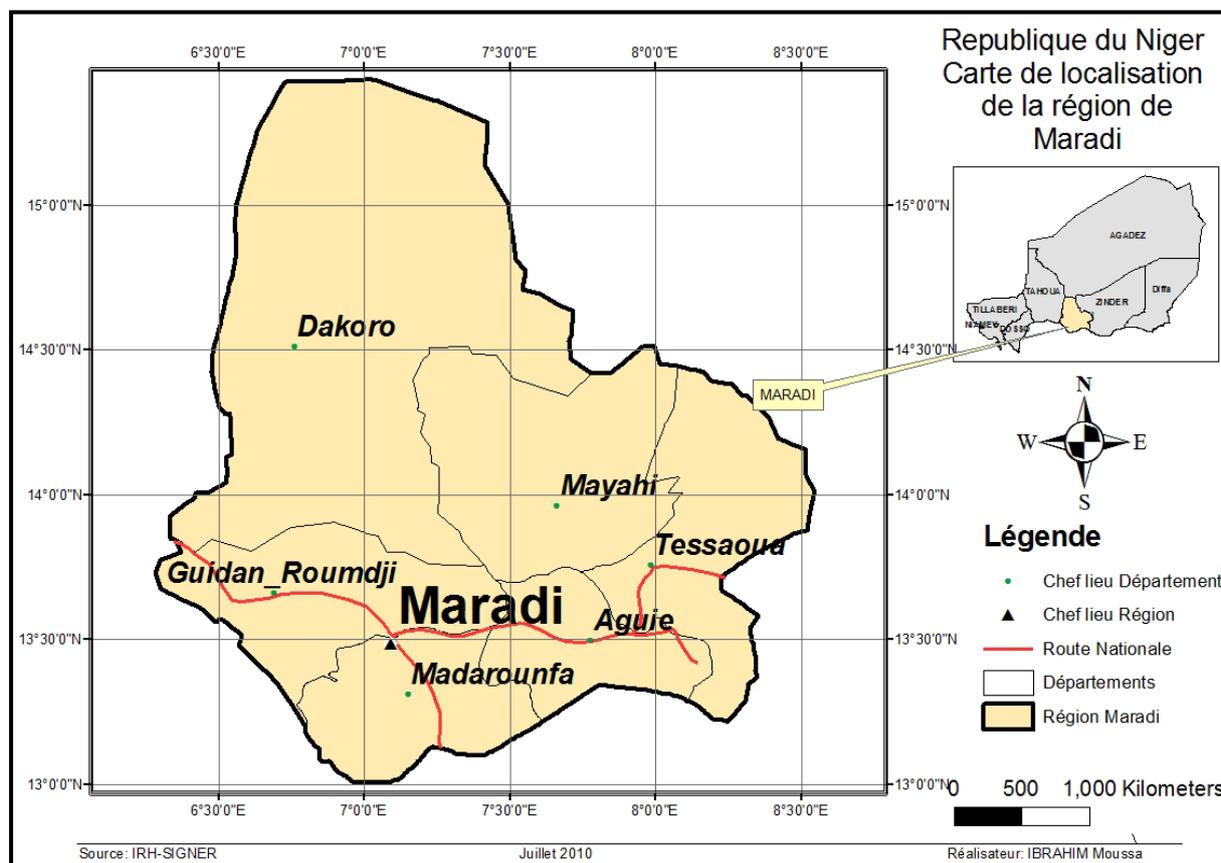
Dans le cadre de la formation en Master Spécialisé en Gestion Intégrée des Ressources en Eau au 2iE de Ouagadougou, les étudiants suivent des cours théoriques qui leur permettent d'acquérir des connaissances de base, effectuent des sorties académiques, réalisent des travaux pratiques et des projets intégrateurs afin de mettre en pratique les connaissances acquises.

Ainsi, cette formation est sanctionnée par un projet de fin d'études réalisé en entreprise, dans une institution de recherche ou de l'Etat, dans un projet ou une organisation non gouvernementale ou dans un bureau d'étude. C'est dans cette logique, qu'une étude qui rentre dans le cadre de l'amélioration de la gestion des ressources en eau potable afin d'assurer un service permanent d'une eau de qualité, a été initiée en collaboration avec la Cellule IRH-SIGNER de la Direction des Ressources en Eau (DRE) du Ministère de l'Eau de l'Environnement et de la Lutte contre la Désertification (MEE/LD). Cette présente étude se déroulera sur toute l'étendue de la région de Maradi et concernera les nappes d'eau souterraine.

I.2 PRESENTATION GENERALE DE LA REGION

La région de Maradi fait partie des huit (8) régions de la République du Niger qui est la capitale économique, compte tenu de la multitude d'unités industrielles qu'elle renferme. Située au centre Sud du Niger entre les méridiens 06° et 09° Est et les parallèles 13° et 16°, cette région couvre une superficie de 41 796 km² soit 3.30 % du territoire national. Elle est limitée :

- ✚ à l'Est par la région de Zinder;
- ✚ au Nord par la région d'Agadez ;
- ✚ à l'Ouest par la région de Tahoua et
- ✚ au Sud par la république fédérale du Nigeria.



Carte n°1: Localisation de la région de Maradi

La région de Maradi est composée de :

- ✚ six (6) départements (Aguié, GuidanRounndji, DakoroMadarounfa, Mayayi,et Tessaoua);
- ✚ quarante sept (47) communes dont 38 rurales et 9 urbaines ; et
- ✚ vingt un (21) cantons et neuf (9) groupements.

I.3 LE MILIEU BIOPHYSIQUE

1.3.1. Le relief et la topographie

La région de Maradi présente un paysage relativement plat même si par endroit on note un relief accidenté. Mais ce relief est également composé de bas-fonds, des cours d'eau et leurs affluents. Sur le plan topographique, les formations sont constituées de collines, de roches et de dépressions périphériques. On rencontre également des dépôts alluviaux qui bordent le long des cours d'eau et des vallées. Elles sont sinueuses et se présentent en forme d'auge avec des versants à pentes fortes.

I.3.2. Le climat

Toute la région de Maradi est soumise à un climat de type sahélo-soudanien. Ce climat se caractérise par deux types de saisons :

- ✚ Une saison pluvieuse au cours de laquelle se pratique l'agriculture sous pluie et qui fait environ quatre mois (juin - Septembre) ;
- ✚ Une saison sèche composée de deux sous saisons à savoir une qui est froide (de novembre à février) au cours de laquelle les températures journalières varient entre 10 à 20 °C et une autre chaude (mars à mai) caractérisée par des températures élevées pouvant atteindre 45°C.

Se situant entre les isohyètes 400 mm et 600 mm, la région de Maradi semble relativement bien arrosée. Toutefois, on note une mauvaise répartition spatio-temporelle des précipitations, ce qui a des conséquences néfastes sur les activités agro-sylvo-pastorales.

Les données pluviométriques collectées auprès de la direction régionale de l'agriculture de Maradi, la pluviométrie moyenne de la commune est de 450 mm de pluie par an. Au cours des sept (07) dernières années, il a plu en moyenne 54 jours par an. Ces données figurent dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau1 :données pluviométriques annuellesde la région de Maradi (1996 – 2009)

Années	Hauteur de pluie (mm)
1996	366,17
1997	375,72
1998	489,18
1999	621,75
2000	459,12
2001	596,67
2002	487,32
2003	563,43
2004	368,96
2005	471,08
2006	424,33
2007	412,35
2008	404,41
2009	339,01
Moyenne	459,2

Source : Direction régionale de l'agriculture de Maradi (Février 2010)

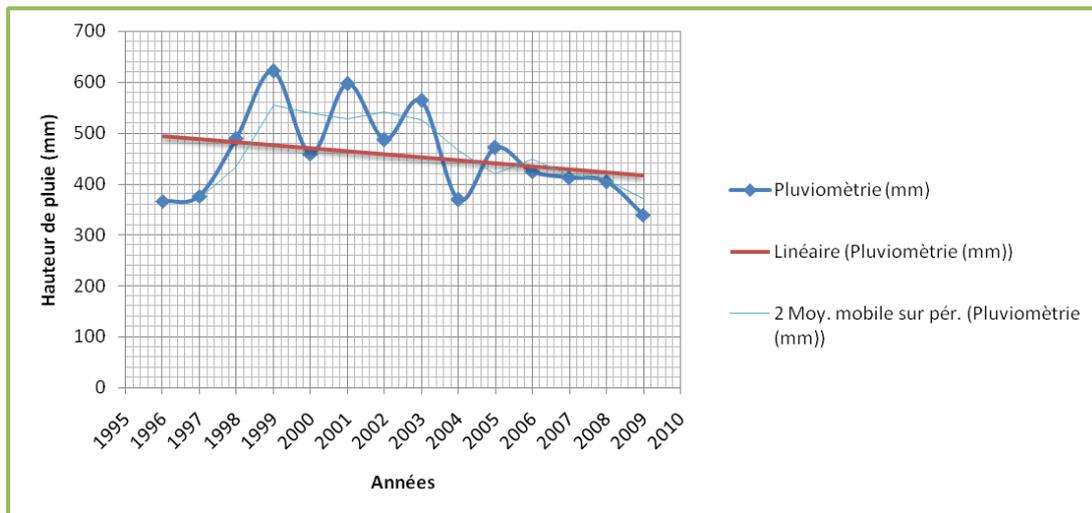


Figure 1: Evolution de la pluviométrie dans la région

L'évolution de la pluviométrie se présente en dents de scie, toutefois on observe une tendance à la baisse.

1.3.3. Les ressources forestières et fauniques

I. 3.3.1 Les ressources forestières

La végétation de la région de Maradi est une savane arborée avec d'une part un tapis important d'herbacées et d'autre part un tapis d'arbres peu dense. On y rencontre des forêts galeries le long des cours d'eau.

D'une manière générale, cette végétation est soumise à une forte dégradation continue due aux aléas climatiques et à la pression foncière qui se manifeste par les défriches anarchiques pour l'agriculture, la coupe du bois vert, les feux de brousse, etc.

I. 3.3.2 La faune

La faune de la région est relativement peu abondante et variée. Cependant on note la raréfaction de certaines espèces qui pourrait s'expliquer par l'assèchement des cours d'eau, l'élargissement des terres culturales, la prolifération des armes à feu, le braconnage et la détérioration des habitats de la faune.

Sans être exhaustif, les différentes espèces qu'on y rencontre sont les suivantes :

- ✚ les gazelles, les outardes, et divers rongeurs; etc. ;
- ✚ des carnivores comme, hyène, chacal etc. ;

✚ des singes patas; des éléphants en provenance de la forêt de Rongou au Nigeria dont la toute dernière date de février 2002.

On note également la présence de plusieurs espèces d'oiseaux tels que les calaos, les francolins, les pintades sauvages, etc.

1.3.4 La géologie

L'essentiel du paysage géologique de la région de Maradi est constitué de trois (3) domaines (illustration annexe2):

✚ *le Socle précambrien (2% de la superficie de la zone d'étude)*

C'est un ensemble de roches cristallines et cristallophylliennes constituées de granite, quartzite et gneiss. Situées dans l'extrême sud de la région, ces roches ne sont aquifères que si elles sont fracturées ou altérées.

✚ *le Continental Hamadien*

Cette unité géologique dite du continental hamadien (CH) est d'extension régionale, et couvre la plus grande partie de la région (environ 90%). Son extension latérale, sa puissance et ses performances hydrodynamiques en font un aquifère d'intérêt capital pour la région, tant du point de vue de ses réserves que de son exploitabilité.

La lithologie du C.H est extrêmement complexe. Elle se caractérise par des variations de faciès latérales et verticales extrêmement rapides. Les formations sédimentaires sont constituées d'argiles et d'argiles sableuses, de sables et de grès, des silts et argiles, des marnes parfois gypsifère, avec des intercalations calcaires.

✚ *les alluvions du Quaternaire ancien et les alluvions récentes*

Ils proviennent de l'érosion du massif cristallin du Nord Nigérian et des alluvions récentes beaucoup moins chargées d'argile, mais de même origines que les précédentes. Les alluvions quaternaires se localisent surtout dans les vallées, cours d'eau fossiles et dépressions. Les produits de remplissage des vallées sont des sables fins et des argiles.

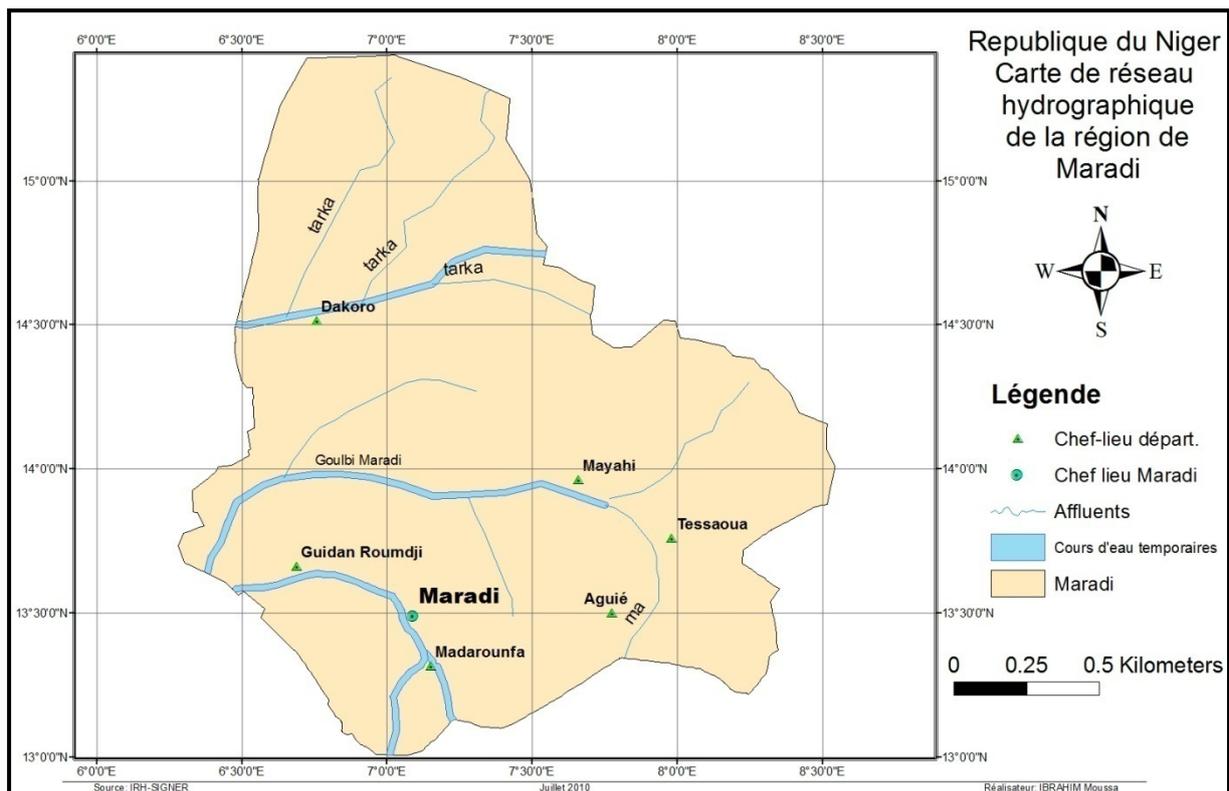
Ces formations constituent des aquifères à nappe libre, fort sensibles aux variations climatiques interannuelles, mais présentant de bonnes caractéristiques hydrodynamiques.

1.3.5 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué de trois principaux cours d'eau qui sont le Goulbi de

Maradi, le Goulbi N’Kaba et la vallée de la Tarka. Parmi ces vallées, seul le Goulbi Maradi connaît des écoulements importants, même s'ils sont saisonniers. Mais depuis la construction du barrage de Jibbia, les écoulements sont devenus très aléatoires.

En outre, on dénombre le lac de Madarounfa (superficie varie entre 600 et 800 ha selon la saison); de petites rivières saisonnières et une cinquantaine mares (permanentes à temporaires) exploitées pour l’abreuvement des animaux et dispersées sur toute l’étendue du territoire régional.



Carte n°2: Situation du réseau hydrographique

1.3.6 Les ressources en eau Souterraine

De part sa position sur la bordure Sud-est du bassin des lullemeden, la région de Maradi dispose des nappes d’eau souterraines dont les performances s’accroissent en direction du Nord-ouest. C’est pourquoi la partie Sud de la région (Madarounfa-Dan Issa), en dépit de la pluviométrie qui est relativement meilleure, ne recèle que des réservoirs aquifères très limités et discontinus.

Dans la région de Maradi, les eaux souterraines se répartissent dans trois unités hydrogéologiques, à savoir :

- ✚ Le système aquifère du continental Hamadien ;
- ✚ Les nappes alluviales des Goulbis et de la Tarka qui sont d'extension limitée ;
- ✚ Les systèmes aquifères discontinus du socle du Sud de Maradi.

Les eaux souterraines contenues dans la nappe du continental Hamadien, couvrent toute la région sauf la bordure Sud où le socle affleure. Les nappes du continental Hamadien sont libres dans la majeure partie de la région et peuvent être localement en charge vers le Nord. Le continental Hamadien constitue un aquifère à l'échelle régionale puisqu'il peut atteindre plusieurs centaines de mètres de puissance et affleure sur plus de 200 000 km² (BRGM, 1978). Selon la même source cet aquifère a une réserve évaluée entre 1000 et 2000 milliards de m³. Son extension latérale, sa puissance et ses performances hydrodynamique en font un aquifère d'intérêt capital pour la région, tant du point de vue de ses réserves que de son exploitabilité. Les débits sont faibles dans la partie supérieure. Ils dépassent 5 m³/h et atteignent localement 50 m³/h dans les termes inférieures. Les eaux sont en général douces (350 à 600 mg/l). Cependant, on note la présence de certains éléments tels que le fluor qui peut se trouver en concentration anormale. Des émanations de gaz toxique sont observées dans les puits profonds de la partie nord de la région, notamment dans le département de Dakoro. Par ailleurs, les nappes du continental Intercalaire/ Hamadien sont des nappes très faiblement alimentées par l'infiltration des eaux de pluie.

Quant à la nappe alluviale des Goulbis et de la Tarka, c'est dans les grès du continental intercalaire que ces Goulbis (GoulbinKaba et Goulbin Maradi) ont creusés leurs vallées, les remplissant successivement par des alluvions anciennes et récentes qui constituent un autre aquifère à l'échelle locale. La profondeur varie entre 1 et 20 m. Les débits des forages atteignent 100 m³/h. La qualité des eaux est en général bonne. Les ressources en eau souterraine des nappes alluviales paraissent les mieux indiquées pour l'irrigation.

Concernant les systèmes aquifères du socle, ils sont localisés à l'extrême Sud de la région sur une faible superficie d'environ 75 km². Ils font partie de l'unité du suggéré indifférent du précambrien inférieur du Nigeria, délimitant la frontière entre les deux pays, et entre les longitudes 06°50' et 07°30'. Sur ces systèmes aquifères de socle, on distingue deux groupes de roches aquifères :

- ✓ La série éruptive (granites, granodiorites et migmatites) avec un taux de réussite de 50% et dont les venues d'eaux s'observent entre 25 et 75 m. La profondeur d'investigation est de l'ordre de 60 m avec des débits compris entre 0.5 et 1.5 m³/h ;

- ✓ La série métamorphique (schistes, gneiss fuis de Maraka et quartzites) avec un taux de réussite de 70% et les venues s'observent entre 25 et 45 m. La profondeur d'investigation est de l'ordre de 60 m avec des débits qui atteignent 2.6 m³/h.

L'ensemble se trouve brutalement plonger de la limite Sud vers le Nord sous la couverture gréseuse d'âge créacé du continental Hamadien avec une pente de 10 m au km.

I. 3.7 Les ressources en sol

On distingue dans la région de Maradi, 5 types de sols :

✚ *Des sols ferrugineux tropicaux lessivés ou appauvris (guezza):*

Ce sont des sols battants, faiblement perméables et favorisant le ruissellement. Contrairement à jigawa (sols ferrugineux tropicaux à texture sableuse dont la fertilité chimique est faible mais d'une bonne perméabilité), ils sont difficiles à travailler ;

✚ *Les sols hydromorphes :*

Ce sont des sols de bas fonds ou fadamaà texture sablo-argileuse, ils sont généralement riches en matières organiques et propices à la culture de sorgho et d'autres productions comme l'horticulture, arboriculture, etc.

✚ *Les sols brunifiés :*

Ce sont des affleurements granitiques qui rapidement font place aux sables éoliens. On les rencontre généralement au Sud de la région ;

✚ *Les sols peu évolués d'apport alluvial ou colluvial :*

Ces sols sont dépourvus de matière organique et sont particulièrement sensibles à l'érosion hydrique et éolienne ;

✚ *Les vertisols sur alluvions ou minéraux brutes :*

Ces sols, si bien drainés, présentent une bonne aptitude agricole, mais sont carencés enphosphore, potassium et soufre.

I.4LE MILIEU HUMAINET ECONOMIQUE

I.4.1 Situation démographique

La population de la région de Maradi est estimée selon le recensement de 2001, à 2 202 035 habitants, avec un taux d'accroissement de 3,6%. Soit une densité moyenne de 52,7 hbt/km².

La région compte cinq groupes ethniques (les Haoussa (80%), les peulh (11%), et les autres ethnies (9%) que sont les Kanouri, les Touareg, et les Djerma) avec les Haoussa qui constituent le groupe majoritaire.

A Maradi, les hommes représentent 62,6% de la population active contre seulement 37,4% de femmes. La grande majorité de la population active (90%) se trouve concentrée en milieu rural contre seulement 10% en milieu urbain, traduisant ainsi la prédominance du secteur primaire. En outre, les départements de Mayahi et de Madarounfa enregistrent les plus fortes proportions d'actifs de la région de Maradi avec des parts respectives de 20,1% et 20,6% selon le RGP de 1988 (Illustration annexe 3).

1.4.2 Activités agro-Sylvo pastorales

L'agriculture est la principale activité économique des populations. Elle couvre 2.489.638 ha sur les 2.744.800 ha soit 91% des superficies cultivables. Les cultures essentielles sont pratiquées sous pluies. Les principales spéculations de vivrières sont le mil, le sorgho et celles de rente sont le niébé, l'arachide et le souchet.

Du point de vue élevage, trois systèmes pastoraux peuvent être distingués à savoir l'élevage sédentaire, l'élevage semi-intensif et l'élevage nomade ou transhumant.

1.4.3 Commerce

Les transactions commerciales se concentrent dans trois principaux centres urbains et quelques marchés (marchés des départements et marchés ruraux) hebdomadaires. Elles concernent surtout des produits agro-sylvo-pastoraux et artisanaux. En plus compte tenu du rôle important que joue le Nigeria voisin et particulièrement la frontière, les marchés frontaliers valorisent les facteurs d'externalité de la région dans l'optique d'une gestion différenciée de la frontière. On peut aussi noter l'une des actions d'envergure, qui est incontestablement le projet de restructuration du marché de Maradi. Cette restructuration, si elle est finalisée, permettra de localiser beaucoup d'opérateur et de faciliter le repérage des produits et une meilleure gestion de l'espace.

1.5 QUALITE DE L'EAU ET CONTAMINATION DE LA RESSOURCE

Avant de traiter cette partie, il faut noter que s'il existe aujourd'hui une question qui mérite

une attention particulière notamment pour une région semi-aride comme Maradi, c'est bien celle de l'eau. Comme nous le savons, la marche vers le développement durable ne peut se concevoir sans une politique conséquente de l'eau. La problématique se situe à plusieurs niveaux et se pose en termes d'accessibilité et de satisfaction des besoins en eau potable. La première contrainte est relative à la faible disponibilité en eau pour l'alimentation des populations et du bétail. L'accessibilité à l'eau est d'autant plus grave que la baisse pluviométrique que connaît la région depuis plus d'une décennie rend la recharge de la nappe phréatique plus difficile. Même dans le cas où l'accessibilité est garantie, la qualité de l'eau reste parfois à désirer.

1.5.1 Qualité de l'eau/Pollution

La qualité d'une eau est l'aptitude de l'eau à servir à un usage défini ou à permettre le fonctionnement d'un milieu donné. Elle est déterminée par ses caractéristiques physiques, chimiques, biologiques ou organoleptiques, à servir à un usage défini ou à permettre le fonctionnement d'un milieu donné.

Quant à la pollution de l'eau, elle est une modification néfaste des eaux causée par l'ajout de substances susceptibles d'en changer la qualité, l'aspect esthétique et son utilisation à des fins humaines. Il y a aussi les écosystèmes. L'agent polluant peut être d'origine physique, chimique ou biologique et provoquer une gêne, une nuisance ou une contamination. (Cours GIRE, 2010)

1.5.2 Source de pollution

La pollution se définit comme les facteurs directs ou indirects qui peuvent affecter la qualité de l'eau (ACF, 2005 : 106). Les causes de pollution peuvent être la résultante des activités humaines ou de phénomènes naturels. Parmi les différentes sources de contamination des eaux souterraines, on peut citer:

- ✚ L'agriculture / Elevage ;
- ✚ Les activités domestiques ;
- ✚ La géologie ;
- ✚ L'industrie ; etc.

I.6 NOTION DE VULNERABILITE/SENSIBILITE

La notion de "vulnérabilité" est définie comme "*une propriété intrinsèque des systèmes aquifères qui dépend de la sensibilité qu'ont ces systèmes aux impacts humains et naturels*". Partant de cette définition, nous pouvons dire que la vulnérabilité est distincte du risque de pollution. Le risque de pollution dépend non seulement de la vulnérabilité, mais également de l'existence d'une charge significative de pollution au-dessus de l'aquifère. Il est possible d'avoir une vulnérabilité "élevée" de l'aquifère, mais aucun risque de pollution, s'il n'existe aucun polluant. Nous pouvons aussi avoir un risque "élevé" de pollution, malgré la vulnérabilité faible, si la charge de pollution est exceptionnelle. Il paraît très important de faire cette distinction, parce que la détermination du risque de pollution est fonction de deux états. Il est déterminé non seulement par les caractéristiques intrinsèques de l'aquifère, qui sont relativement statiques et à peine changeables, mais également de l'existence des activités potentielles de pollution, qui sont des facteurs dynamiques et qui peuvent en principe être contrôlés (Lobo-Ferreira et *al.*, 1995).

II JUSTIFICATION ET OBJECTIFS DE TRAVAIL

II.1 JUSTIFICATION DE TRAVAIL

Le niveau d'accès aux services d'alimentation en eau potable et d'assainissement au Niger est parmi les plus faibles en Afrique. En 2006, les taux d'accès à l'eau potable et à l'assainissement en milieu rural au Niger, se situent respectivement à 42% et 7% (UNICEF, 2008). Cette situation a une incidence sur la santé des populations rurales et pourrait hypothéquer les progrès économiques de ce pays dont environ 78 % (SDR, 2003) de la population vit en milieu rural.

Pour assurer l'alimentation en eau potable, il est de plus en plus nécessaire de prendre des mesures de traitement et de protection des eaux souterraines qui exigent, tant sur le plan technique que financier, des moyens considérables et croissants du fait des pollutions. Dans le cadre de la GIRE, dont l'objectif ici est l'amélioration des conditions de vie des populations pauvres de la zone d'étude avec un accent particulier sur les polluants les plus vulnérables que sont le Fluor, les Nitrates et les Nitrites.

La Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE), qui vise à une protection cohérente de toutes les masses d'eau en Europe, demande d'atteindre le bon état des eaux souterraines en 2015 mais aussi de détecter et d'inverser toute tendance à la hausse significative et durable de la concentration des polluants.

En effet, si la réalisation de ces projets aussi très coûteux semble avoir résolu les problèmes d'eau potable dans certains villages, il est plutôt inquiétant de constater qu'après le désengagement des bailleurs de fonds et le départ des exécutants, le problème de gestion des installations d'eau potable est toujours resté une autre préoccupation qui affecte sérieusement l'approvisionnement en eau sur le plan quantitatif et qualitatif. Le droit à l'eau potable signifie que toute personne, sans discrimination, doit avoir accès pour ses besoins essentiels à une eau en quantité et qualité suffisante, accessible physiquement et économiquement et fournie dans les meilleures conditions possibles.

L'Association nigérienne de défense des droits de l'Homme (ANDDH) révélait au cours d'un point de presse tenu le samedi 23 décembre 2000, Niamey, capitale du Niger, qu'un drame s'est joué à quelque 600 km d Niamey, non loin de la frontière avec la République fédérale du Nigeria dans une ville appelée Tibiri dans la région de Maradi où cinq mille (5.000) enfants

ont été empoisonnés. Les raisons ne sont autres qu'une intoxication aux fluorures, concluent les médecins. *"A forte dose les fluorures (F) sont des toxiques aigus pour l'homme. Ils provoquent des gastro-entérites hémorragiques ou lanéphrite toxique aiguë"*, constate le médecin orthopédiste. L'eau d'un forage profond (174 mètres), creusé en 1983 et mis en service en 1985 a été incriminée. En effet, sa teneur en fluorures (supérieure à 3mg/litre et grimant parfois à 6,9 mg/litre), largement supérieure à la norme préconisée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) de 1,5 mg/litre, a provoqué chez toute une génération d'enfants âgés au début de ce siècle de quinze mois à quinze ans, des handicaps allant de la décoloration de l'émail dentaire en voie de minéralisation à, pour quelque 500 d'entre eux, une atteinte du squelette qui se traduit par des malformations osseuses d'une extrême gravité.

Aucun n'est épargné, les affections frappent indifféremment les filles et les garçons, dans les huit quartiers de Tibiri. Les générations les plus touchées ont aujourd'hui entre 21 et 25 ans. Il n'est pas rare que tous les enfants d'une même fratrie soient invalides. Pourtant, à la naissance, les enfants sont parfaitement normaux ; jusqu'à l'acquisition de la marche vers l'âge de deux ou trois ans, où commencent à apparaître, outre des fièvres, vomissements et convulsions, d'atroces douleurs osseuses, une hypertrophie crânienne parfois, et une couleur brunâtre des dents souvent. Les premiers cas ont été recensés en 1987. *"Quand vous les voyez, en pleine détresse respiratoire, tant ils sont ankylosés, vous pleurez"*, se souvient un médecin.

La catastrophe aurait été causée par la présence naturelle d'une quantité excessive de fluor dans l'eau potable.

Les nitrates représentent une menace pour notre environnement, surtout pour l'eau du sol et l'eau en surface. Pour l'homme, les nitrates en eux-mêmes ne sont pas si dangereux, et une grande partie est excrétée via les reins. Les adultes peuvent supporter temporairement des doses élevées de nitrates (10 g) sans danger pour leur santé, exception faite de diarrhées et de nausées. De telles quantités correspondent à la teneur en nitrates présente dans cinq grosses salades pommées. Seul un faible pourcentage des nitrates recirculent via la circulation sanguine et les glandes salivaires dans la cavité buccale, où ils sont transformés par des bactéries en nitrites, qui sont eux bel et bien néfastes. L'absorption directe de nitrites au départ de l'alimentation est faible.

Les concentrations de nitrites dans l'estomac sont beaucoup plus importantes étant donné que

les nitrates sont transformés en nitrites, tant dans l'alimentation que dans la salive. Chez des adultes sains, environ 5 % de la quantité totale de nitrates absorbée est transformée en nitrites. Le problème est que chez les nouveau-nés, ce pourcentage peut augmenter jusqu'à 80 % et entraîner une coloration bleue de la peau ou cyanose, une affection rare mais sévère dans laquelle le transport d'oxygène est compromis. Chez un adulte, les nitrites ne sont dangereux que s'ils se lient dans l'estomac à des acides aminés, formant ainsi des nitrosamines, dont des expériences de laboratoire ont démontré qu'ils sont cancérigènes. Il est intéressant de savoir en outre que diverses études épidémiologiques ont révélé que chez de grands consommateurs de fruits et de légumes, on a constaté une diminution du nombre de cas de cancers gastriques, ce qui indique que l'influence négative potentielle des nitrates est neutralisée par des facteurs protecteurs, tels que fibres, vitamines et minéraux. Dans l'eau potable, cette protection est absente, il s'agit, dès lors, de faire plus attention (KALUBI D., 2009)

II.2 OBJECTIFS DU TRAVAIL

II.2.1 Objectif global

L'objectif global de cette étude est de contribuer à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) dans la région de Maradi.

II.2.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques consistent à :

-  Utiliser les méthodes d'application des Systèmes d'Information Géographique (SIG) au domaine de l'eau pour identifier les zones à forte pollution et les zones propices dans les départements de la région de Maradi pour couvrir les besoins en eau tout en sécurisant la population ;
-  Caractériser la vulnérabilité et la sensibilité à la pollution du système aquifère de la zone d'étude ;
-  Montrer l'évolution dans l'espace et dans le temps de la pollution des nappes d'eau souterraine de la région.

III MATERIEL ET METHODES

III.1 DONNEES ET MATERIEL UTILISES

III. 1.1Données

Dans le cadre de ce travail, plusieurs données multi sourcesont été utilisées. 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 la DRH/Mdi (2006 - 2010) dans la région ;
- ✚ des données de points d'eau modernes (PEM) de la région fournies par la cellule IRH-SIGNER ;
- ✚ des données cartographiques (cartes topographiques, carte des aquifères, carte d'occupation du sol) fournies par la division hydrogéologique de la DRE/MEE/LCD ;
- ✚ des données pluviométriques des stations de l'ensemble de la région obtenues au niveau de la direction régionale de l'agriculture de Maradi.

III.1.2 Matériel

Le matériel utilisé est essentiellement composé :

- ✚ d'un matériel informatique et scientifique (ordinateur portable, scanner HP scan Express A3 USB, imprimante HP Desk jet 6540; une sonde électrique, un conductivimètre et un GPS) ;
- ✚ des éléments de collectes de données (bloc notes, crayons, stylos...);
- ✚ de logiciels : un logiciel est un ensemble de programmes relatifs au fonctionnement de divers traitements d'information. Il permet d'effectuer les manipulations et les transformations possibles à l'aide des différentes commandes. Les logiciels utilisés dans le cadre de cette étude sont :
 - ✓ ARCVIEW 3.2a : il permet de voir, d'explorer, d'analyser des données géographiques dans un environnement bureautique. Ses fonctionnalités de cartographie et ses capacités de traitement SIG avancées permettent de créer des cartes qui intègrent et présentent les données (ESRI, 2002) ;
 - ✓ ARCGIS 9.3: C'est le SIG complet de ESRI qui reprend toutes les fonctionnalités de ArcView 3.2 et qui intègre en plus le traitement des images et les métadonnées.

- ✓ Excel et Access dans la création des tables et la représentation graphique.

III.2 METHODOLOGIE DE TRAVAIL

III.2.1 Phase préparatoire de l'étude

Prise de contact avec la structure d'accueil (Illustration annexe 4)

Avant d'aller sur le terrain, une réunion de prise de contact entre le Directeur des Ressources en Eau (DRE) du MEE/LCD, le Responsable de IRH-SIGNER et le stagiaire moi-même a été tenue. Au cours de cette réunion le sujet de stage a été expliqué et compris et le cadre logique établi par l'étudiant a été réajusté. Les conditions pratiques du stage et les orientations par rapport au travail sur le terrain ont été définies.

Recherche documentaire

Cette étape a nécessité la réalisation d'un certain nombre d'activités préalable que l'on peut énumérer selon l'ordre chronologique suivant :

- ✓ Les recherches bibliographiques sur les lois, décrets et arrêtés relatifs à la mise en valeur, la gestion et la planification des ressources en eau ;
- ✓ La révision générale et l'analyse des documents collectés sur la gestion des ressources en eaux ;
- ✓ Collecte, traitement et analyses de données recueillies sur le site d'étude ;

Sortie sur la région de Maradi

Une sortie sur Maradi à 600 km de Niamey a été effectuée en vue de collecter et ou mettre à jour les données portant sur les suivis piézométrique et physico-chimique réalisés par la Direction Régionale de l'hydraulique (DRH) de Maradi sous financement de la coopération suisse. Il s'agit de :

- ✓ *Suivi de la qualité physico-chimique de l'eau (de 2006 – 2010 tous les 3 mois):*
 - Trente (30) puits du continental intercalaire répartis dans les 6 départements ;

- Vingt (20) puits des zones alluviales (zone de maraîchage intense) ; et
 - Dix (10) forages en zone de socle.
- ✓ *Suivi piézométrique (de 2006 – 2010 tous les 3 mois) :*

Nivellement au GPS des cinquante (50) piézomètres retenus au total.

Cette sortie sur la zone d'étude a coïncidé avec le chronogramme de mission établis par la DRH pour le programme de la coopération suisse. Donc une mission sur le terrain a été effectuée pour le suivi piézométrique et qualitatif des eaux de la nappe alluviale. Ceci se résume à :

- ✓ *La mesure piézométrique*

Les mesures piézométriques ont été effectuées in situ à l'aide d'une sonde électrique.

- ✓ *L'analyse physico-chimique*

Les mesures de la température, pH, la dureté totale et la conductivité électrique ont été réalisées in situ. Le pH des eaux analysées est mesuré à l'aide des bandelettes indicatrices de pH. La conductivité a été mesurée par un conductivimètre model 125, S/N 002033, 1996, Type Orion. Les éléments majeurs, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, sont analysés au laboratoire de la Direction Régional de l'Hydraulique de Maradi. Les analyses de NO₂²⁻, NO₃⁻, et F⁻, sont aussi réalisées dans le laboratoire de la Direction Régional de l'Hydraulique de Maradi à l'aide d'un spectrophotomètre.

III.2.2 Phase de travail à l'IRH-SIGNER

III.1.2.1 Démarche d'évaluation de la vulnérabilité de la nappe

L'évaluation de la vulnérabilité s'est faite à partir de deux méthodes DRASTIC et GOD. L'utilisation de ces méthodes se justifie par leur complémentarité. L'importance de la méthode GOD réside dans le fait qu'elle tient seulement compte des facteurs les plus significatifs pour évaluer la vulnérabilité. La base de données relative à ces paramètres est facilement accessible contrairement à la méthode DRASTIC où les paramètres tels que la recharge, la zone non saturée qui jouent un rôle prépondérant dans la migration d'un polluant sont évalués avec beaucoup d'approximations.

III.1.2.1.1 Méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC (développée par l'Agence américaine de protection de

l'environnement USEPA) exige dans un premier temps la caractérisation détaillée des unités hydrogéologiques du territoire à cartographier. Il s'agit notamment de la définition des sept paramètres physiques qui sont d'ailleurs à l'origine de l'appellation DRASTIC et qui interviennent dans les phénomènes de transport et d'atténuation des contaminants (Aller et *al.*, 1987). L'importance de chaque facteur 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 le moins (Tableau 2 ci-dessous).

A chaque paramètre est attribué une "Cote" variant de **1** à **10**, selon la particularité du milieu. Les conditions de moindre vulnérabilité procurent des cotes faibles, tandis que celles qui l'augmentent, procurent des cotes élevées. La vulnérabilité est évaluée par "**l'Indice DRASTIC**", qui est un indice numérique représentant la somme pondérée de sept cotes correspondant aux sept paramètres hydrogéologiques. L'indice local est obtenu en multipliant la "Cote" de chaque paramètre par son "**Poids**" relatif et, en faisant la somme de ces produits. La carte de vulnérabilité à la pollution permet de visualiser les principales zones sensibles qui sont liées à des indices élevés.

Pour faciliter l'interprétation, les valeurs possibles de l'indice DRASTIC sont subdivisées en cinq intervalles ou classes.

Tableau 2 : Paramètres hydrogéologiques DRASTIC avec leurs poids respectifs (Sinan et *al.*, 2007)

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

III.1.2.1.2 Cartographie des zones vulnérables à la pollution par l'indice DRASTIC

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères par la méthode DRASTIC passe par le calcul de l'indice DRASTIC (ID). L'indice DRASTIC (ID) est calculé selon la formule (1) (Osborn et *al.*, 1998) :

$$ID = Dc \times Dp + Rc \times Rp + Ac \times Ap + Sc \times Sp + Tc \times Tp + Ic \times Ip + Cc \times Cp \quad (1)$$

Où les indices c et p désignent respectivement la "cote" et le "poids" du paramètre. Ce calcul prend en compte les sept paramètres hydrogéologiques. Pour chaque paramètre, la "cote" est multipliée par le "poids" correspondant. La somme des nombres (cote multipliée par poids) obtenus de chaque paramètre, permet d'obtenir l'indice DRASTIC. La valeur minimum de l'indice est de "23", tandis que le maximum est de "226". De telles valeurs extrêmes sont rarement obtenues dans des études de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Des études ont montré que l'indice DRASTIC possède « 50 » comme valeur minimum et « 200 » comme valeur maximum (Lobo-Ferreira et al., 1995). Un exemple de calcul figure dans le tableau 3.

Tableau 3 :Exemple de calcul de l'indice DRASTIC

Paramètre	Cote	Poids	Nombre (Cote × Poids)
D	7	5	35
R	1	4	4
A	8	3	24
S	5	2	10
T	9	1	9
I	8	5	40
C	2	3	6
Indice DRASTIC			128

Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices DRASTIC calculés. D'une manière générale, les classes proposées par la méthode DRASTIC sont consignées dans le tableau 4.

Tableau 4 :Intervalles des valeurs des indices DRASTIC et classes correspondantes (Murat et al., 2003)

Intervalle	Classe DRASTIC
23 – 80	Vulnérabilité très faible
80 – 100	Vulnérabilité faible
100 – 140	Vulnérabilité modérée
140 – 180	Vulnérabilité forte
180 – 226	Vulnérabilité extrême

Après le calcul des indices DRASTIC à partir de la combinaison des sept paramètres suivant la formule (1), nous avons obtenu une carte des indices DRASTIC. La classification de la carte des indices en fonction des plages définies par la méthode, a permis d'élaborer la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines au niveau de la région de Maradi.

Dans la figure 2 ci dessous, sont résumées les étapes entrant dans la réalisation de la carte de

vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines au niveau de la région de Maradi.

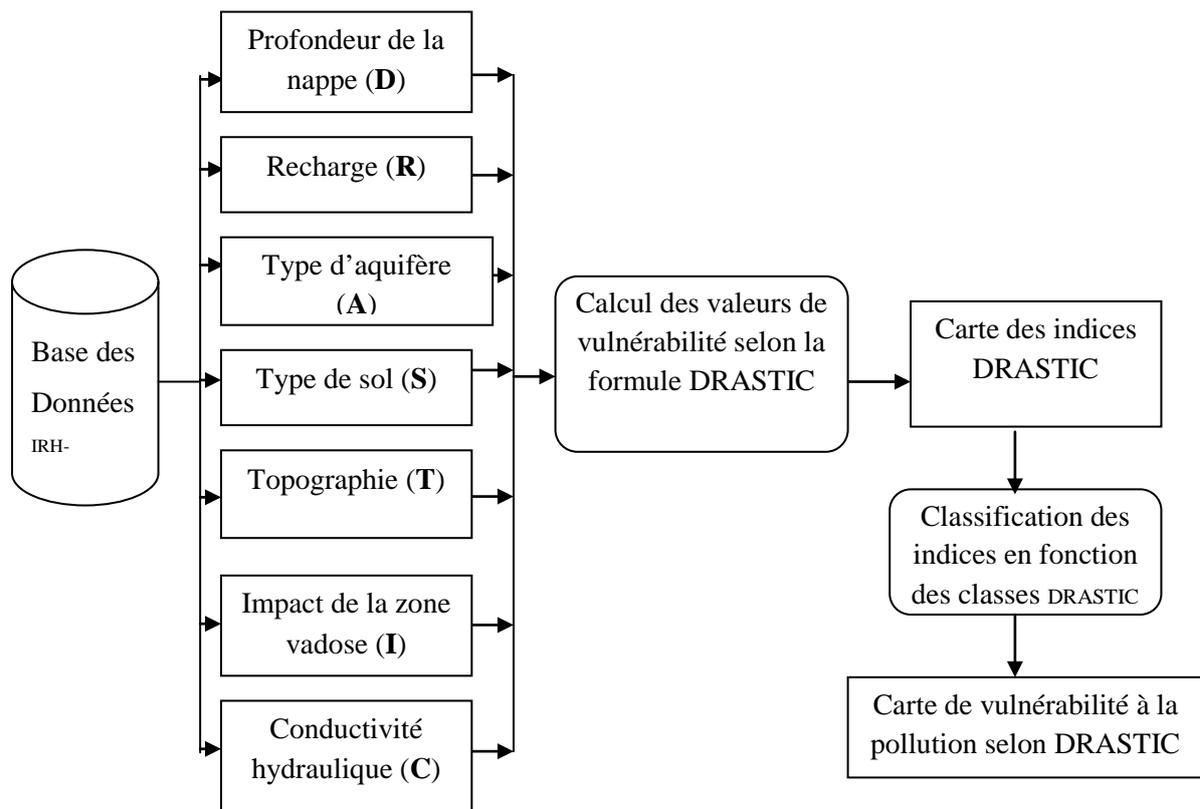


Figure 2: Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC

III.1.2.1.3 Méthode GOD

La méthode GOD utilise aussi une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée. L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres.

Le premier réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (**C_i**). Le deuxième correspond à la profondeur de la nappe (**C_p**) et le troisième est défini par la lithologie de l'aquifère (**C_a**) (Murat et al., 2003). Les cotes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à « 1 ».

L'indice GOD qui permet d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution est obtenu par la multiplication de ces trois paramètres.

Dans le cas de la méthode DRASTIC, le paramètre "type d'aquifère" (**G**) permet de caractériser l'aquifère, celui de la méthode GOD sert à déterminer si l'aquifère est libre ou confiné (Tableau 5 ci-dessous).

Tableau 5 : Cotes attribuées au paramètre « type d'aquifère » (Sinan et al., 2007)

Type d'aquifère	Cote
Artésien	0,1
Confiné	0,2
Semi-confiné	0,3
Libre avec couverture	0,4 – 0,6
Libre	0,7–1

Pour la lithologie de la zone non saturée (**O**)Ce paramètre prend en compte les propriétés des constituants de la zone non saturée. Il s'agit de la porosité relative, de la perméabilité et du coefficient d'emménagement (Murat et al., 2003). Ce paramètre est semblable à la zone vadose réalisée précédemment au niveau de la méthode DRASTIC. La cotation des classes de ce paramètre par cette méthode est donnée par le tableau 6.

Tableau 6 : Cotes attribuées au paramètre « lithologie de l'aquifère » (Sinan et al.,2007)

Lithologie de l'aquifère	Cote
Sol résiduel	0,4
Limon alluvial, lœss, 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

Quant au paramètre « Profondeur de la nappe » (**D**), il correspond à la distance entre le sol et la surface piézométrique de la nappe. Son élaboration est identique à celle réalisée au niveau de la méthode DRASTIC. Les cotes attribuées aux différents intervalles de profondeur selon GOD sont consignées dans le tableau 7. Elles sont comprises entre « **0,4** » (profondeur importante) et « **1** » (profondeur faible).

Tableau 7: Cotes attribuées au paramètre « profondeur de la nappe »(Sinan et al., 2007)

Profondeur de la nappe (m)	Cote
< 2	1
2–5	0,9
5–10	0,8
10–20	0,7
20–50	0,6
50 – 100	0,5
> 100	0,4

III.1.2.1.4 Cartographie des zones vulnérables à la pollution par l'indice GOD

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères par la méthode GOD passe par le calcul de l'indice GOD (IG). L'indice GOD (IG) se détermine selon l'équation (2) (Murat et al., 2000) :

$$IG = Ca \times Cl \times Cd \quad (2)$$

Avec

C_a : Type d'aquifère ; C_l : Lithologie de l'aquifère ; C_d : Profondeur de la nappe.

L'indice GOD a pour valeur minimum « 0 » et « 1 » comme valeur maximum. Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices obtenues. D'une manière générale, les indices GOD sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême"(Tableau 8). Le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice GOD.

Tableau 8: Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes correspondantes(Murat et al., 2003)

Intervalle	Classe GOD
0 – 0,1	Vulnérabilité très faible
0,1 – 0,3	Vulnérabilité faible
0,3 – 0,5	Vulnérabilité modérée
0,5 – 0,7	Vulnérabilité forte
0,7 – 1	Vulnérabilité extrême

La classification de la carte des indices GOD en tenant compte de la vulnérabilité a permis l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines au niveau du de la région de Maradi. Les différentes étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode GOD sont résumées dans l'organigramme de la figure 3.

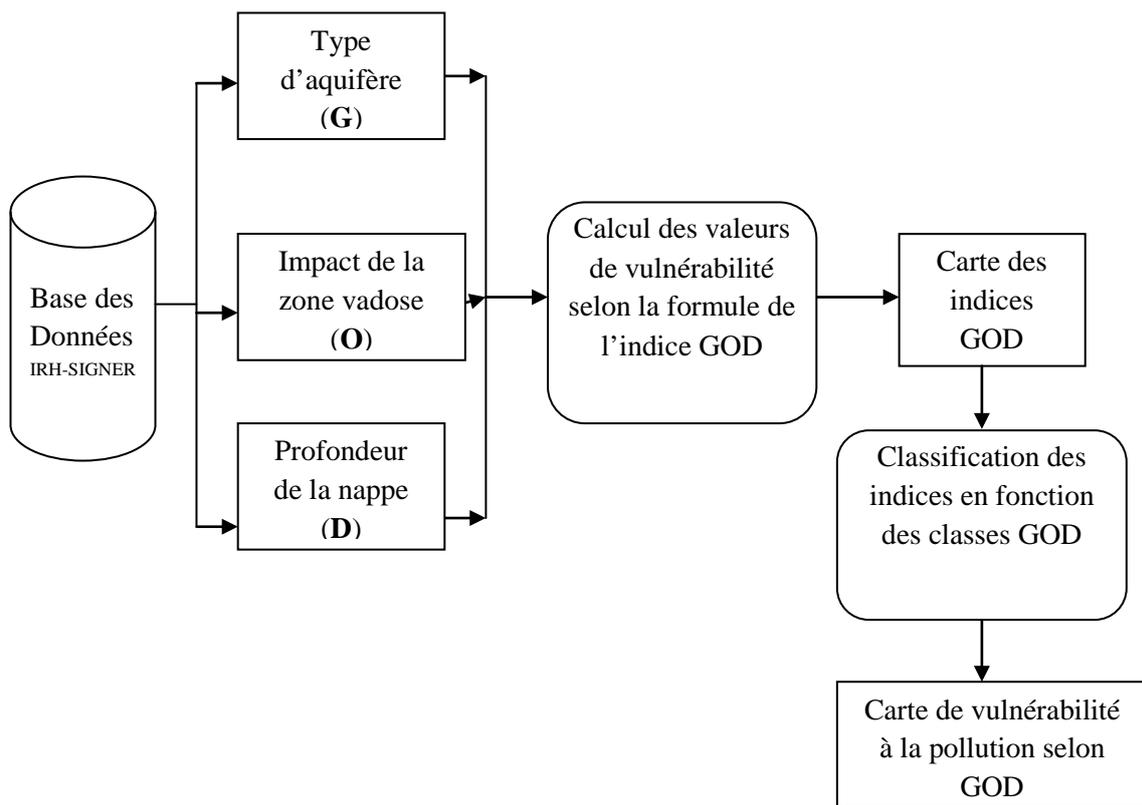


Figure 3: Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode GOD

III.1.2.2 Démarche d'évaluation de la sensibilité de la nappe

La sensibilité d'une nappe à la pollution est une notion non mesurable dépendant des paramètres propres de la nappe, car elle est définie par rapport à une pollution qui a déjà atteint la nappe, à partir, de la non saturée ou d'un ouvrage d'eau souterraine (puits, forage, etc.).

III.1.2.2.1 Méthodologie d'évaluation de la sensibilité de la nappe

Nous avons utilisé les trois paramètres suivants pour caractériser cette sensibilité à la pollution des nappes:

- ✚ Qualité de l'eau: plus cette qualité est importante, plus grande est la sensibilité à la pollution de la nappe;
- ✚ Productivité : plus la productivité est importante, plus grandes seront les conséquences socio-économiques de la pollution de l'eau;

- ✚ Vitesse de déplacement de l'eau : plus la vitesse est grande, plus vite se fera le déplacement de la pollution dans l'espace et donc la sensibilité à la pollution devient importante.

Une pondération a été attribuée à chacun des paramètres ci-dessus, basée essentiellement sur l'importance relative de chacun d'eux pour la caractérisation de la sensibilité d'une nappe à la pollution. Ces poids sont de 5 pour la qualité globale de l'eau (étant donné l'importance de ce paramètre, notamment pour une eau destinée à l'alimentation en eau potable), 4 pour la productivité et 3 (identique au poids attribué par la méthode DRASTIC à la perméabilité de la nappe) pour la vitesse de l'eau de la nappe.

La méthode DRASTIC utilise la perméabilité pour caractériser l'écoulement de l'eau dans la nappe. Ce paramètre n'est pas suffisant pour caractériser cet écoulement qui dépend de la vitesse effective de l'eau. Les cartes de sols et d'aquifères ont été utilisées afin de définir les cinq (ou trois) classes de vitesse auxquelles les notes suivantes ont été attribuées (Tableau 9).

Tableau 9 : Notes de la vitesse de déplacement de l'eau souterraine

Vitesse effective (V_e)	Note
$V_e \geq 5$	10
$3 \leq V_e < 4$	7
$2 \leq V_e < 3$	5

Pour le paramètre « Productivité de la nappe », il est représenté par les débits spécifiques des ouvrages. Cinq classes de débit-spécifique ont été définies, auxquelles les notes suivantes ont été attribuées (Tableau 10).

Tableau 10 : Notes de la Productivité de la nappe (Sinan et al., 2003)

Débits spécifiques (Q/s en l/s/m)	Note
$Q/s \geq 5.0$	10
$2.0 \leq Q/s < 5.0$	7
$0.5 \leq Q/s < 2.0$	5
$0.0 \leq Q/s < 0.5$	3
$Q/s = 0.0$	0

Quant au paramètre « Qualité de l'eau », il est représenté par la conductivité électrique de l'eau, qui dépend uniquement de la concentration totale en sels dissous dans l'eau, dont la mesure est très facile. Cinq classes de conductivité électrique ont été définies, auxquelles les notes suivantes ont été attribuées (Tableau 11).

Tableau 11 :Notes de laQualité de l'eau (Sinan et *al.*, 2003)

Conductivité (C en µS/cm)	Note
C < 400	10
400 ≤ C < 1 300	8
1 300 ≤ C < 2 700	5
2 700 ≤ C < 3 000	3
C ≥ 3 000	1

III.1.2.2.2 Cartographie des zones sensibles à la pollution

La cartographie de la sensibilité(voir annexe5) à la pollution de l'aquifère passe par le calcul de l'indice (Is). L'indice (Is) s'est déterminé selon l'équation (3) (Sinan et *al.*, 2003) :

$$Is = (Cr \times Cw) + (Pr \times Pw) + (Vr \times Vw) \quad (3)$$

Avec:

C, P et V : représentent respectivement les paramètres : conductivité de l'eau, productivité de la nappe (ou débits spécifiques des ouvrages la captant) et vitesse de déplacement de l'eau dans la nappe.

r et w : représentent respectivement le poids et la note attribués à chaque paramètre ci-dessus. Les valeurs de l'indice Is varient entre 20 (Is minimal) et 120 (Is maximal).Après le calcul de l'indice, on reporte la répartition spatiale des valeurs de l'indice (Is) aux différentes plages d'indices obtenues. D'une manière générale, les indices (Is) sont répartis en cinq classes de sensibilité allant du "très faible" à "extrême"(Tableau 12).

Tableau 12: Intervalles des valeurs de l'indice IS et classes correspondantes(Sinan et *al.*, 2003)

Intervalle	Classe de Sensibilité
20 < Is ≤ 40	Sensibilité très faible
40 < Is ≤ 60	Sensibilité faible
60 < Is ≤ 80	Sensibilité modérée
80 < Is ≤ 100	Sensibilité forte
100 < Is ≤ 120	Sensibilité extrême

III.1.2.3 Validation des cartes de vulnérabilité

Chaque carte de vulnérabilité élaborée est testée et validée par des mesures et l'analyse de données. La validité de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les méthodes

DRASTIC et GOD, dans le cas de cette étude, a été testée par la pollution des nitrates dans les eaux. Cette activité a été réalisée en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de la nappe et la distribution des classes de vulnérabilité.

La validation des cartes de vulnérabilité obtenues a porté sur l'analyse du taux de nitrates contenu dans les eaux souterraines de la région de Maradi. Ces analyses d'eaux souterraines concernent 53 échantillons.

IV RESULTATS

IV.1 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DES NAPPES DE LA REGION DE MARADI

La sortie sur Maradi et la phase de travail à l'IRH-SIGNER ont permis de caractériser l'évolution spatio-temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région à travers certains paramètres d'analyse notamment la conductivité électrique (à 25°C).

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau.

La présence des matières dissoutes dans l'eau qui influencent la mesure de la conductivité dépend notamment du degré de solubilité de la roche et du type de roches. Ainsi, on peut noter que les points d'eau qui contenaient beaucoup de fluorure d'origine géologique sont des eaux très minéralisées (conductivité élevée).

IV.1.1 L'évolution dans l'espace et dans le temps de la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale

Les eaux de la nappe alluviale de Maradi sont moyennement minéralisées (Figure 4 et 5), avec des valeurs toujours supérieures à 100 µS/cm. La moyenne des valeurs mesurées se situe à 301.93 µS/cm et un écart-type de 137.36 µS/cm. Il faut noter toutefois une tendance à la hausse de la pollution en fonction pour les deux échantillons (Tibiri et Safo Oubandawaki) choisis selon le paramètre d'analyse physico-chimique (conductivité électrique).



Figure 4: Variation spatiale des valeurs de la conductivité électrique en zone alluviale campagne Nov.2006

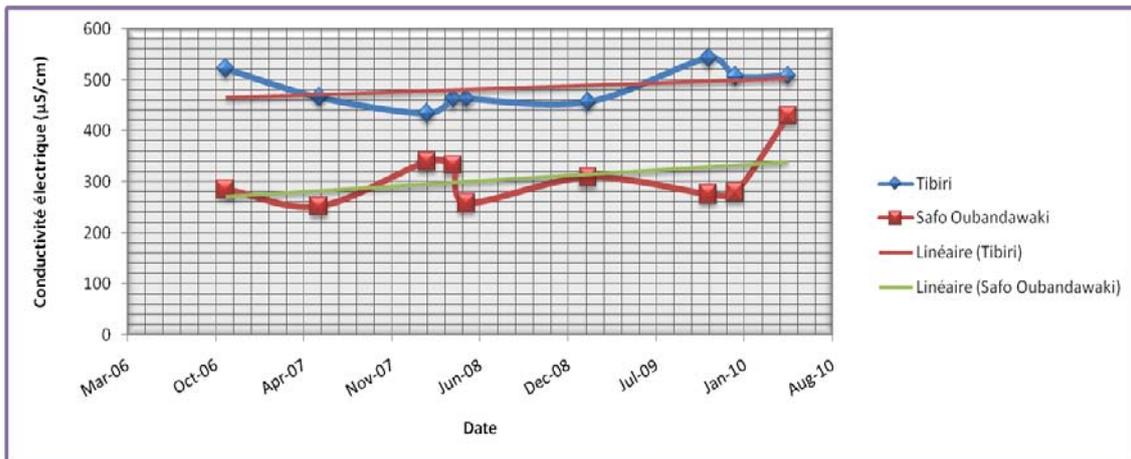


Figure 5: Variation temporelle des valeurs de la conductivité électrique en zone alluviale de Nov.2006 à Mai 2010

IV.1.2 L'évolution dans l'espace et dans le temps de la pollution des eaux souterraines de la nappe du Continental Hamadien (CH) et du socle

Quant à l'eau de la nappe du Continental Hamadien et du socle, l'évolution dans l'espace et dans le temps de leur minéralisation (moyenne = 204.08µS/cm ; écart-type = 136.28µS/cm) se schématise comme suit(Figure 6 et 7):

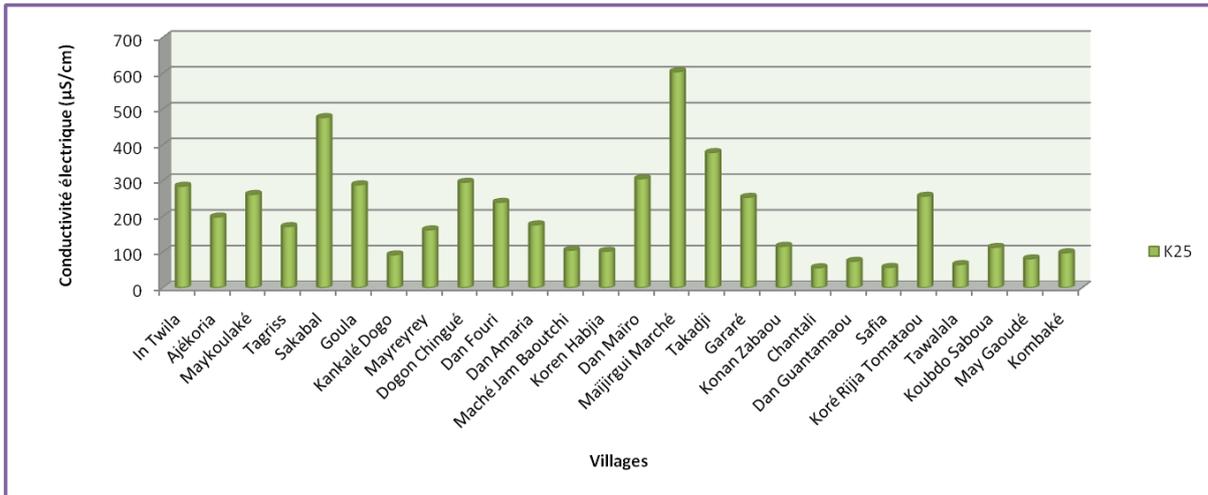


Figure 6: Variation spatiale des valeurs de la conductivité électrique en zone Continental Hamadien et socle campagne Nov.2006

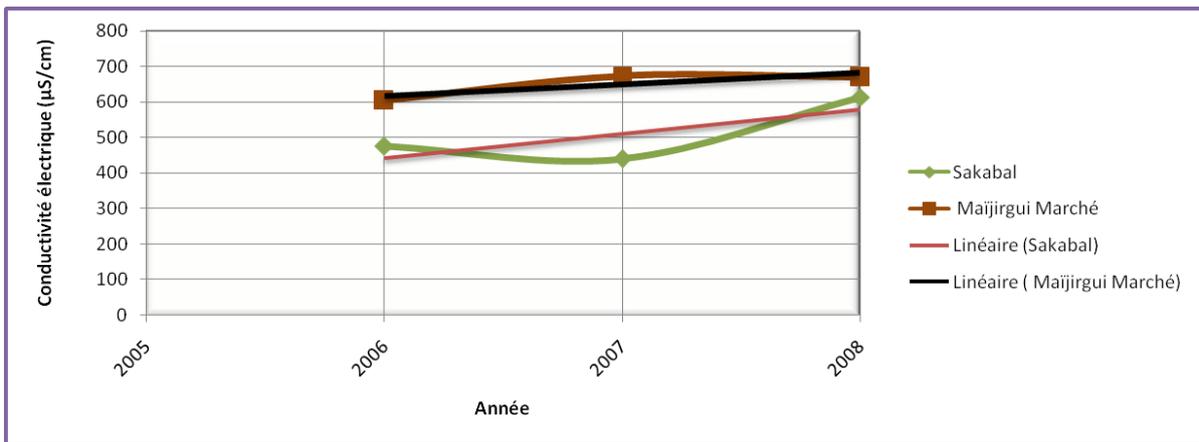


Figure 7: Variation temporelle des valeurs de la conductivité électrique en Zone Continental Hamadien de 2006 à 2008

Néanmoins, une variation de conductivité peut également s'expliquer par la présence d'une zone de mélange des eaux ou par une pollution. Par exemple, une conductivité élevée a été constatée dans une AEP à Maijirgui, or l'analyse de nitrate faite sur cet ouvrage a révélé que la pollution due aux activités humaines (exemple: carrière), était très importante. Dès lors, il est possible que la conductivité élevée de Maijirgui soit due à la pollution. Au vue des courbes de tendance (Maijirgui et Sakabal) sur la figure 7, cette pollution croit en fonction du temps.

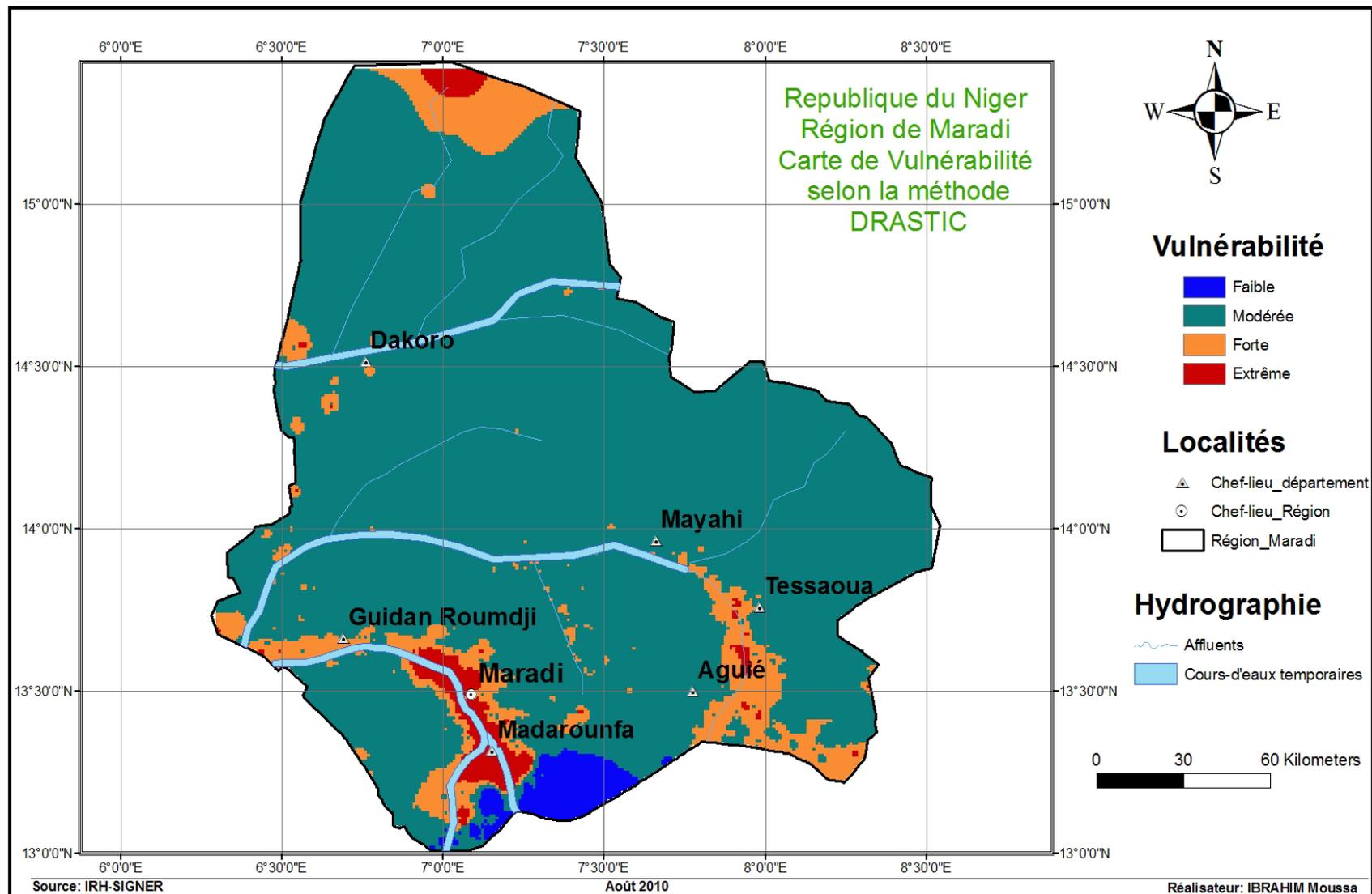
IV.2 CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DES NAPPES DE MARADI SELON LA METHODE DRASTIC

Avant de présenter les résultats, nous discuterons de l'évaluation des paramètres, notamment, ceux de la recharge et de la conductivité hydraulique (perméabilité). La recharge est l'un des paramètres le plus difficile à évaluer. En effet il existe peu de méthodes directes qui permettent d'obtenir la valeur de ce paramètre. De plus, il s'agit d'un phénomène discontinu spatialement (les zones de recharge étant locales) et une interpolation biaiserait le résultat aux limites des zones de recharge de valeurs différentes. Les valeurs de recharge obtenues constituent une approximation régionale, le résultat peut varier en fonction de la qualité des données et de la méthode utilisée.

L'estimation de la conductivité hydraulique présente des difficultés du fait de la forte variation spatiale de ce phénomène et de l'impossibilité d'obtenir une couverture de données pour la région.

Dans le cas de la méthode DRASTIC, l'élaboration de la carte de vulnérabilité s'effectue par le calcul de l'indice de vulnérabilité (I_{DRASTIC}) qui intègre les sept paramètres, selon la formule (1). La carte obtenue révèle 9 classes d'indices. Les valeurs des indices obtenus oscillent entre "**101**" (valeur minimum) et "**195**" (valeur maximum).

Les plages de vulnérabilité élaborées à partir des neuf classes d'indices obtenues varient du "**Faible**" au "**Très forte**". Quatre (4) degrés de vulnérabilité à la pollution sont mis en évidence par la méthode DRASTIC. Une telle classification tient compte des valeurs minimum et maximum d'indices obtenus et non des classes standard définies par Aller et *al.* (1987). La carte issue de cette classification est illustrée à la **Carte n°3** ci-dessous.

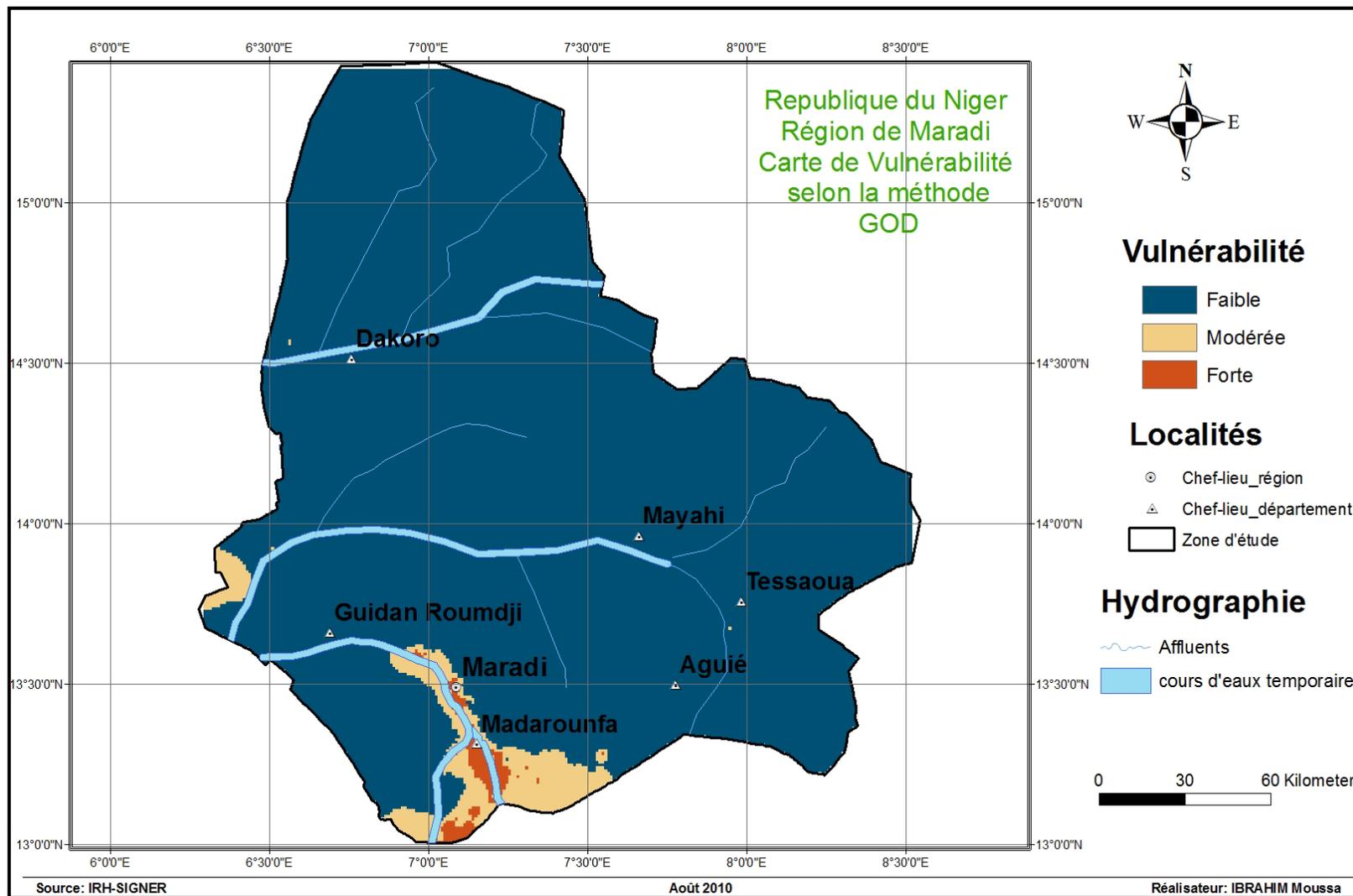


Carte n°3: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi selon la méthode DRASTIC

IV.3 CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DES NAPPES DE MARADI SELON LA METHODE GOD

S'agissant de la méthode GOD, on procède de la même manière que la méthode DRASTIC. L'indice de vulnérabilité (I_{GOD}) est calculé à l'aide de l'équation (2). La carte de vulnérabilité réalisée par le calcul de l'indice de vulnérabilité (IG) révèle également neuf (9) classes d'indices. Les valeurs des indices obtenus varient de "0,12" (valeur minimum) à "0,54" (valeur maximum).

La classification adoptée dans cette étude tient compte des indices GOD obtenus. Ainsi, les plages de vulnérabilité élaborées à partir des indices GOD varient du "**Faible**" au "**forte**" : Compte tenu de la variation de nos indices GOD qui vont de 0,12 à 0,54 ; toutes les plages de vulnérabilité ne sont pas présentes dans notre zone d'étude et la carte issue de cette classification est illustrée à la **Carte n°4** ci-dessous.



Carte n°4: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi selon la méthodeGOD

IV.4 ANALYSE COMPARATIVE DES RESULTATS DES DEUX METHODES UTILISEES

IV.4.1 Superficie des différentes zones de vulnérabilité

Afin de comparer les cartes de la vulnérabilité à la pollution résultant des deux méthodes, quatre classes identiques de vulnérabilité ont été choisies. En outre, la surface occupée par chaque classe a été calculée et transformée en pourcentage (Tableau 13).

Tableau 13: Superficie des différentes zones de vulnérabilité

Méthode	Degré de vulnérabilité							
	Faible		Modéré		Fort		Très Fort	
	Superficie (en km ²)	Valeur calculée (en %)	Superficie (en km ²)	Valeur calculée (en %)	Superficie (en km ²)	Valeur calculée (en %)	Superficie (en km ²)	Valeur calculée (en %)
DRASTIC	791.980572	2.03	33681.49003	86.38	3555.04758	9.12	962.410598	2.47
GOD	37105.4903	95.17	1561.509752	4	322.459937	0.83		

IV.4.2 Distribution des degrés de vulnérabilité à la pollution

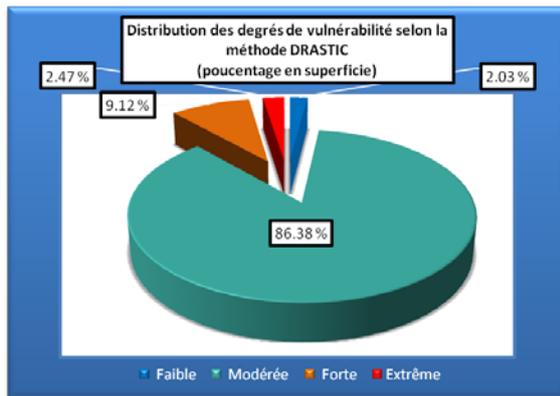


Figure 8: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution de la région de Maradi selon DRASTIC

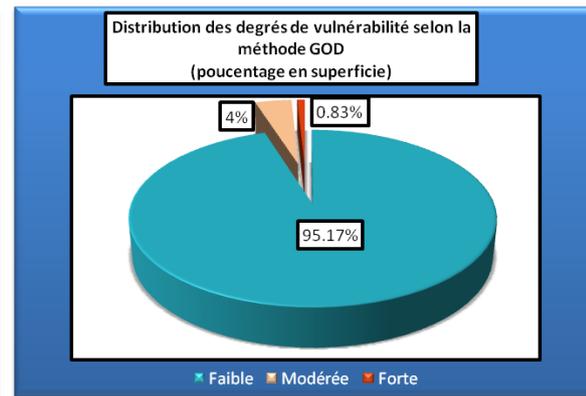


Figure 9: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution de la région de Maradi selon GOD

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).

Les commentaires suivants peuvent être faits:

- ✚ la vulnérabilité par DRASTIC est concentrée entre « modérée » et « forte » (95.5%) avec 86.38% pour la classe « moyenne » et 9.12% pour la « forte » ;
- ✚ la méthode GOD a la vulnérabilité concentrée entre « faible » et « modérée » (88,18%) avec 95.17% pour la classe « faible » et 4% pour la « modérée ».

Les méthodes DRASTIC et GOD ont évalué une vulnérabilité concentrée respectivement entre les classes « faible » et « modérée » ; mais, la méthode DRASTIC a renseigné en plus sur la classe « extrême » avec 2.47%. Le tableau 13 révèle aussi que la classe « forte » est peu représentée par les méthodes GOD (0,83%).

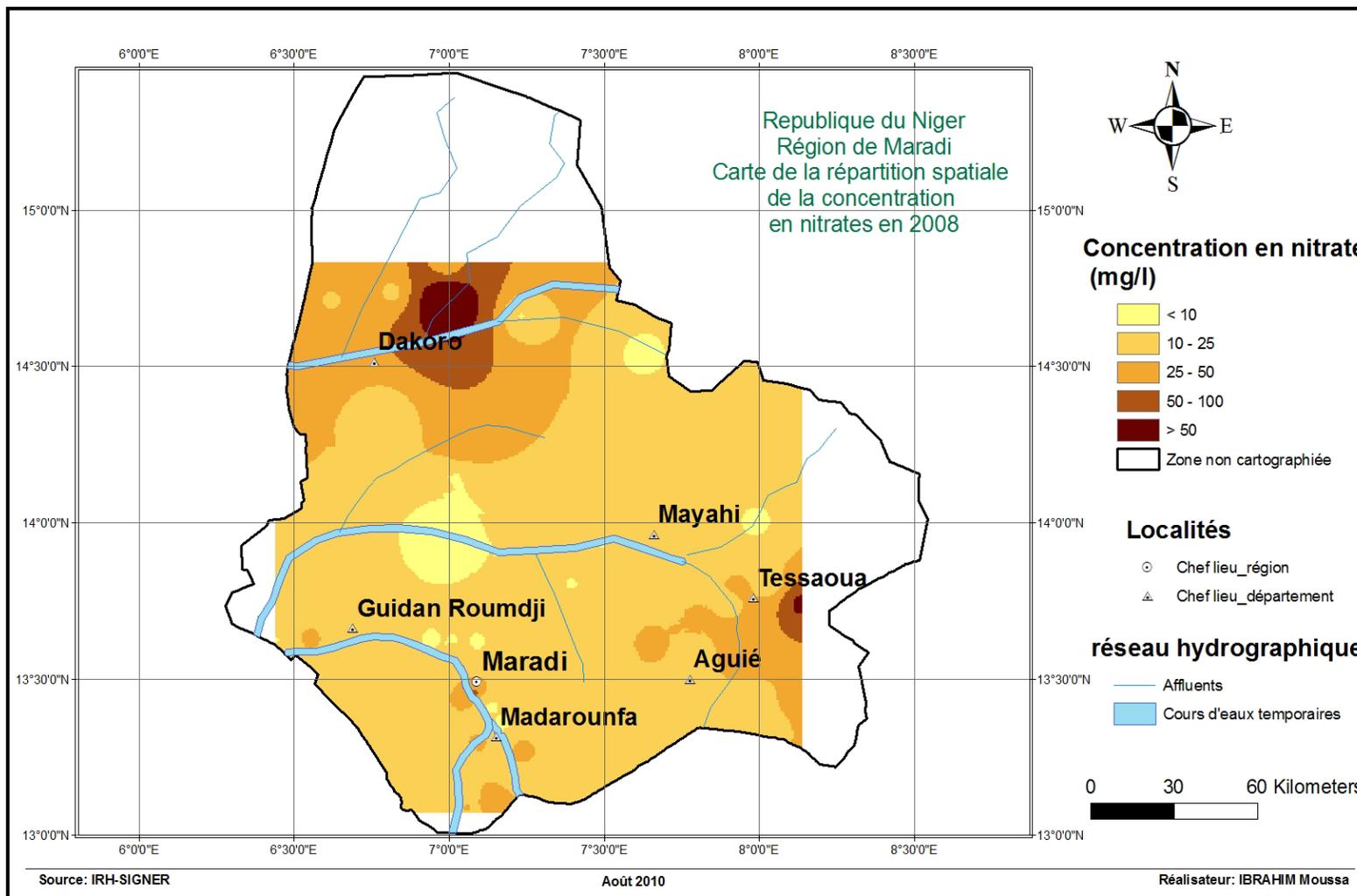
IV.5 VALIDATION DES CARTES DE VULNERABILITE A LA POLLUTION

La détérioration de la qualité de l'eau souterraine est appréciée par mesures des paramètres physico-chimiques et bactériologiques (Anonyme, 2001). Plusieurs auteurs ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines. Dans la validation des cartes de vulnérabilité, les zones réellement contaminées doivent correspondre à celles où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés. Une zone vulnérable peut également avoir un faible indice de vulnérabilité du fait que la notion de vulnérabilité n'est pas synonyme d'une pollution actuelle, mais plutôt d'une prédisposition de ces zones à une contamination éventuelle, si rien n'est entrepris pour les protéger.

La validation des cartes de vulnérabilité a porté sur l'analyse du taux de nitrates contenu dans les eaux souterraines de la région de Maradi. Les données ont été fournies par la DRH/Mdi et ne concernent que les zones rurales de la région de Maradi pour l'année 2008.

Les taux de nitrates contenus dans les eaux souterraines sont compris entre 3 et 210 mg/L. La carte issue de ces données (**Carte n°5 ci-dessous**) montre une répartition spatiale de la concentration de nitrate au niveau de Maradi. Elle révèle que la majeure partie sud de Maradi a un taux de nitrates plus ou moins supérieur à 50 mg/L (norme de qualité l'eau de boisson de l'OMS). La forte concentration en nitrates (> 50 mg/L) est observée dans quelques communes du département de Dakoro, Tessaoua et Madarounfa et une partie des communes de Maradi et GuidanRoundji. Nous pouvons déduire de cette observation que la pollution progresse dans

le sens nord -sud avec un nouveau pôle de pollution à l'Est.



Carte n°5: Carte de la répartition spatiale de la concentration en nitrates en 2008

Les cartes de vulnérabilité produites par les différentes méthodes ont montré qu'on assiste à une progression de la pollution du Sud au Nord. Les zones à fort taux de nitrates (> 50 mg/L), progressant également du Nord vers le Sud, se superposent aux zones de très forte à forte vulnérabilité à la pollution. La superposition de ces deux types de zones (vulnérabilité forte et taux de nitrate élevé) permet de dire que la carte établie par ces méthodes reflète la réalité du terrain.

V DISCUSSION ET ANALYSES

La difficulté dans la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution réside dans le nombre de facteurs hydrogéologiques à prendre en compte. L'une des difficultés de l'application des méthodes DRASTIC et GOD est aussi les limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres. En effet, les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes.

L'étude de la vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC et GOD a permis de déceler trois classes de vulnérabilité identique faible, modérée, et forte. Ces trois classes croissent du Sud vers le Nord selon la méthode DRASTIC.

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. L'analyse des cartes de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi a révélé que :

- ✚ le degré de vulnérabilité progresse du Sud vers le Centre et du Nord vers le Centre ;
- ✚ la partie sud de la région appartient à une vulnérabilité très forte.

En ce qui concerne les cartes de vulnérabilité réalisées selon les méthodes DRASTIC et GOD, leur comparaison est intéressante car elle permet de mettre en évidence les différences dans l'évaluation de la vulnérabilité. Compte tenu des résultats obtenus lors des travaux et des données utilisées pour chacune des méthodes, on s'attendait à ce que les cartes soient similaires pour les deux méthodes, mais moins fine dans le cas de celle produite par la méthode GOD. Les résultats qui se dégagent de chacune de ces deux cartes peuvent être résumés à l'aide d'un certain nombre de constatations.

Dans le cas de la méthode DRASTIC, on obtient une carte dont près de 87% de la surface est représentée par des zones à vulnérabilité modérée (**Carte n°3**). Ces zones se situent aux endroits où il y a présence de sable ou de roche 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, mais sur une faible épaisseur. Les zones de recharge reconnaissable à une vulnérabilité plus forte. L'ensemble de la carte montre un découpage en classe de vulnérabilité assez fin pour une carte d'échelle régionale. Ainsi, même si les frontières ne peuvent pas être tracées avec précision, cela permet de mettre en évidence les différents secteurs de manière plus fine.

Dans le cas de la méthode GOD, on obtient une carte qui est en majeure partie

à vulnérabilité faible (**Carte n°4**). C'est une carte régionale à valeur relatives. Toutefois, la méthode ne permet pas de qualifier les zones de recharges comme étant à plus forte vulnérabilité que les secteurs environnants, d'évaluer dans quelle mesure elles le sont, ou de les mettre en évidence. La méthode permet cependant de classer les secteurs en fonction du degré d'infiltration, une caractéristique régionale dont l'information reste très difficile à obtenir localement. 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. Ce qui est effectivement le cas pour la méthode DRASTIC mais pas dans celui de la méthode GOD.

Si on compare les deux méthodes, on remarque que la méthode DRASTIC permet d'obtenir une information plus fine au niveau de la représentation de la vulnérabilité (**Carte n°3**). Cela est relié à un découpage des indices en quatre (4) classes par rapport à trois (3) classes pour la méthode GOD. L'information s'en trouve plus diversifiée et le découpage de la carte élaborée par la méthode DRASTIC, plus varié que celui de la carte produite par la méthode GOD. Cela a peut être un impact sur l'évaluation de la vulnérabilité, qui apparaît d'après la méthode GOD. Un autre point à noter est que la méthode GOD n'utilise que trois (3) paramètres contre sept (7) pour la méthode DRASTIC. Dans le cadre de cette étude, il semble que la quantité d'information acquise pour l'évaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD ne soit pas suffisante pour comprendre le fonctionnement du système aquifère puisque la carte produite est très uniforme.

En résumé, la méthode GOD ne semble pas adaptée à l'évaluation de la vulnérabilité dans le cas d'aquifères moins bien caractérisés et dans les territoires dont les caractéristiques sont complexes. La méthode DRASTIC, au contraire, permet une évaluation qui semble correspondre aux attentes puisque les zones à forte vulnérabilité se situent dans les zones de recharge et dans les zones à faible épaisseur de sédiments. L'intérêt de cette évaluation réside dans la connaissance de la variabilité relative à la vulnérabilité dans l'ensemble du territoire.

Les cartes obtenues sont des cartes 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. Par ailleurs, les résultats de la validation des cartes de vulnérabilité établies pourraient être plus représentatifs si un nombre plus important de mesures de nitrates bien réparties sur toute l'étendue de la région de Maradi était effectué, ce qui nécessiterait une nouvelle campagne de mesures dans les eaux de la nappe.

VICONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'alimentation en eau potable des populations de la région de Maradi est assurée essentiellement par l'eau souterraine dont la qualité est sans cesse mise à l'épreuve par les diverses sources potentielles de pollution. Cependant les zones des nappes alluviales du Goulbi et de la Tarka sont les plus vulnérables d'après les cartes de vulnérabilité. Par ailleurs, il faut noter qu'il y a un échange hydraulique entre la nappe alluviale du Goulbi de Maradi et la nappe du Continental Hamadien (CH) dans la zone de Djiratawa qui constitue aussi une zone de recharge du CH. Il est important que des mesures soient prises afin de protéger les aquifères. L'évaluation de la vulnérabilité en est une. L'application des méthodes DRASTICet GOD a permis dans cette étude d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque à la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi. Ce thème développé dans cette étude a permis de définir des outils d'aide à décision pour la prévention et la protection contre la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi. Les principaux apports de ce mémoire sont de deux ordres :

Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Maradi selon différentes méthodes

Elle permet de prendre les dispositions nécessaires en vue d'assurer une meilleure protection des eaux souterraines. L'estimation de la vulnérabilité est une notion relative. Il convient de préciser que les résultats sont parfois subjectifs et qu'ils sont interprétables d'une méthode à l'autre.

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

L'eau souterraine étant la seule source d'approvisionnement en eau potable de la région de Maradi, une contamination de celle-ci peut constituer un risque grave pour les populations consommatrices et pour la SEEN. Les principaux résultats de ce mémoire permettront de définir les zones de protection des sources d'eau afin de mieux protéger les populations contre les maladies d'origine hydrique et contre la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Ils faciliteront l'installation des activités économiques et industrielles dans la région de Maradi, sans que celles-ci ne représentent une menace pour la qualité des eaux souterraines. Enfin, la prise en compte de ces résultats par les autorités nigériennes contribuera à diminuer les coûts de production d'eau et donc le prix de l'eau distribuée aux nigériens, car il est facile de trouver dans la zone des points d'eau abandonnés du fait de la pollution. Ainsi, l'accès des populations démunies à l'eau potable sera donc facilité.

Perspectives

Comme perspectives, Il conviendrait :

- ✚ de déterminer la recharge réelle de la nappe du Continental Hamadien par l'implantation d'un réseau de piézomètres ainsi qu'un programme de suivi des niveaux d'eau ;
- ✚ de cartographier la vulnérabilité spécifique aux polluants tels que le nitrate, les hydrocarbures et les pesticides au niveau de la région de Maradi;
- ✚ d'appliquer ces approches méthodologiques sur tout le territoire nigérien ;
- ✚ d'analyser les risques environnementaux engendrés par les décharges non contrôlées dans la région de Maradi et hors Maradi.

VI RECOMMANDATIONS

Au vu des résultats obtenus pour chacune des deux méthodes, celle que nous retiendrons ici est la méthode DRASTIC. Celle-ci permet de mettre en évidence les zones de recharge comme étant les plus vulnérables de la zone d'étude. La méthode montre que la région présente dans son ensemble une vulnérabilité modérée. La méthode GOD présente des résultats moins précis et moins cohérents pour une prise de décision.

A la suite de cette étude, il est recommandé que soient réalisés des travaux plus approfondis sur les erreurs présentes sur la carte de vulnérabilité DRASTIC et sur la manière dont les erreurs se propagent lors de son élaboration. Ceci permettra que les prises de décisions basées sur de telles cartes soient, reflètent autant que se faire la situation réelle du terrain. De plus il serait intéressant de valider les résultats obtenus par la méthode DRASTIC avec des modèles numériques qui pourraient être basés sur le temps d'infiltration. Cela permettrait de montrer à quel point la réalisation de telles cartes peut contribuer concrètement à l'aménagement du territoire en général et à la gestion intégrée des ressources en eau en particulier.

VIII BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles consultés

- 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.
- Anderson M. et Woessner W. (1992), Applied groundwater modeling and advective transport, Academic Press, Inc. London, pp. 234-350.
- Burrough P.A. et McDonell R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems Spatial Information Systems and Geostatistics, Oxford University Press, 333 p.
- Dikolela KALUBI (2009), Rapport Final, Etude diagnostique sur la qualité de l'eau dans le département de GuidanRoumdji, Ambassade de Suisse, Bureau de la coopération suisse au Niger, 64 P.
- Direction régionale de l'Hydraulique de Maradi (2006), Rapport de mission, suivi de la qualité des eaux de la région, Maradi, DRE Maradi, 15 P.
- El Morjani Z. (2002), Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de doctorat, Université de Genève, Terre et Environnement Vol. 42, 300 p.
- Fonds Africain de Développement (2006), du Projet d'approvisionnement en eau Potable et d'assainissement en milieu rural dans les régions de Maradi, Tahoua et Tillabéry, Rapport d'évaluation, 78p.
- FMI (2007), Stratégie de Développement Accéléré et de Réduction de la Pauvreté, Niger 2008 - 2012, 255p.
- GWP/RIOB. 2009, Manuel de Gestion Intégrée des Ressources en Eau par Bassin, Publié par le Partenariat mondial de l'eau (GWP) et le Réseau international des organismes de bassin (RIOB), 112 p.

- Isabel D., Gelinas P. et Aubre F. (1990), Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Rev. Sc. Tech. Eau, 23 p.
- Lobo-Ferreira J. P., Novo E. M. et Oliveira M. M. (1995), Groundwater vulnerability mapping: Application to the Minho watershed in Northern Portugal's Celtic Region, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal, 7 p.
- Ministère du Développement Agricole (2006), Etude de mobilisation des Eaux dans la Région de Maradi, synthèse, version provisoire, Niamey Ministère de Développement Agricole, DAERA, 38 P.
- Ministère de l'Hydraulique, Direction des Ressources en Eau (2008), Rapport de Synthèse, Etude de capitalisation de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Niger et dans la sous-région ouest-africaine, Assistance technique ROYAL HASKONING (Pays-Bas) – Agri-Sahel-Service (Niger), 50 p.
- Ministère de l'Hydraulique et Ministère de la Santé Publique. (2009), Stratégie opérationnelle pour le Programme National d'Alimentation en Eau Potable et d'Assainissement, 79 P.
- Mohamed R. M. (2001), Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC, Sciences et changement planétaires / sécheresse, vol. 12, n°2, pp. 95-101.
- Mohamed S., et Najoua B. (2007), Utilisation des SIG pour la comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution, Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc), 41p.
- Mohamed S., Rachid M. et Moumtaz R. (2003), Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc, 25 p.
- Morris B., Litvak G. et Ahmed K. (1998), Urban groundwater protection and management: lessons from 2 developing city case studies in Bangladesh and Kyrgyzstan, Groundwater protection and management for developing cities, BGS, DFID, 25 p.

- Murat V. (2000), Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont LAURENTIEN. Mémoire de maîtrise, INRS – Géosciences, Québec, 127 p.
- Murat V., Paradis D., Savard M. M., Nastev M., Bourque E., Hamel A., Lefebvre R. et Martel R. (2003), Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : Evaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources naturelles Canada, Commission Géologique, 16 p.
- NER/94/002, (1999), Schéma directeur de mise en valeur et de gestion des ressources en eau du Niger. Le Référentiel du secteur de l'eau et de l'assainissement au Niger, 151p.
- Osborn N. I., Eckenstein E. et Koon K.Q. (1998), Vulnerability assessment of twelve major aquifer in Oklahoma. Oklahoma water resourcesboards, technical report, 14 p.
- Prof. Eric PICARD (2006), Analyse Spatiale des données Géo-environnementales, Faculté des sciences appliquées, Département GémoaC, Université de Liège, 85 p.
- République du Niger (2004), Consultation Sectorielle sur l'Environnement et la Lutte Contre la Désertification : Diagnostic Régional de Maradi, 36p.
- République du Niger (2004), Stratégie de Développement Rural. Le secteur rural, principal moteur de la croissance économique, 64p.
- Secrétariat Permanent de la SRP - CAB/PM (2002), Stratégie de Réduction de la Pauvreté.
- Sinan M., 2000, Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par la combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Doctorat d'Etat. Univ. Mohamed V. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, 372 p.
- UNICEF (2008), Country, Regional and Global Estimate Water and Sanitation, 16p.
- WHO (2006), Guidelines for drinking-water quality [electronic resource]: incorporating first addendum. Vol. 1, Recommendations, 3rd ed., Geneva, WorldHealth Organization, 35 p

Yacouba KONATE (cous 2iE 2009), Pollution et Protection des ressources en eau, 79p.

Sites Internet Consultés

<http://www.unicef.fr/contenu/actualite-humanitaire-unicef/22-mars-journee-mondialede-leau-2005-03-24>[consulté en mai 2010]

<http://www.u-picardie.fr/~beaucham/cours-du/du-8.htm>[consulté en mai 2010]

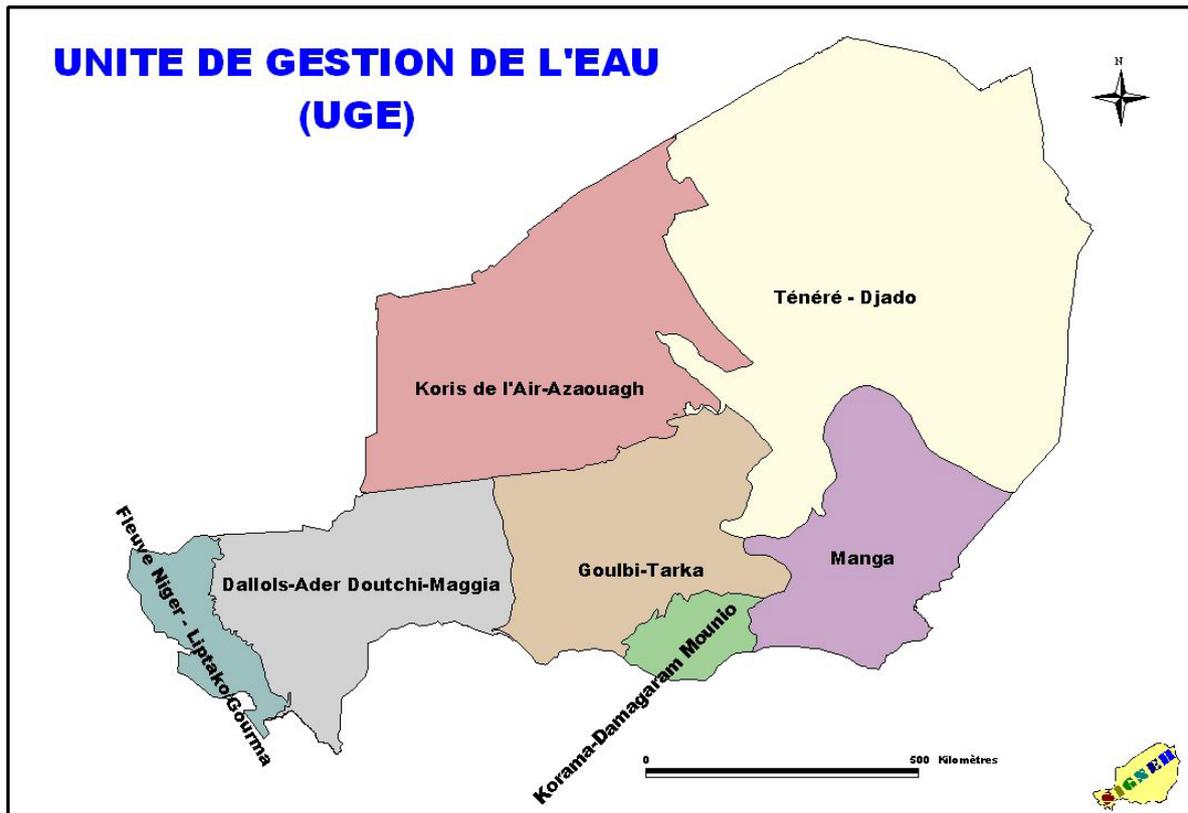
<ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa>[consulté en juin 2010]

<http://www.esri.fr>[consulté en juin – Août 2010]

<http://georezo.net/forum/>[consulté en Août 2010]

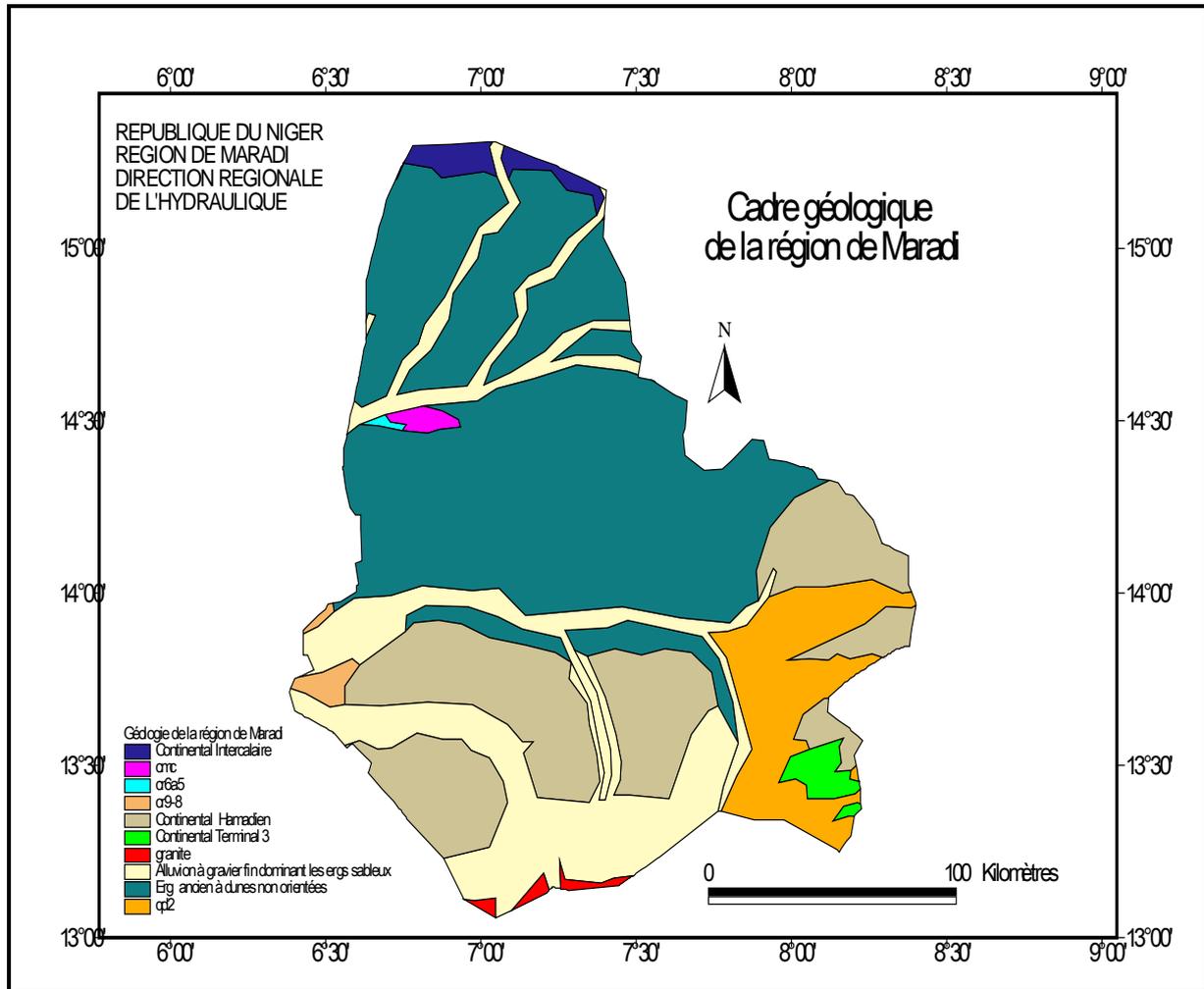
ANNEXES

Annexe 1: Carte des Unités de Gestion de l'Eau du Niger



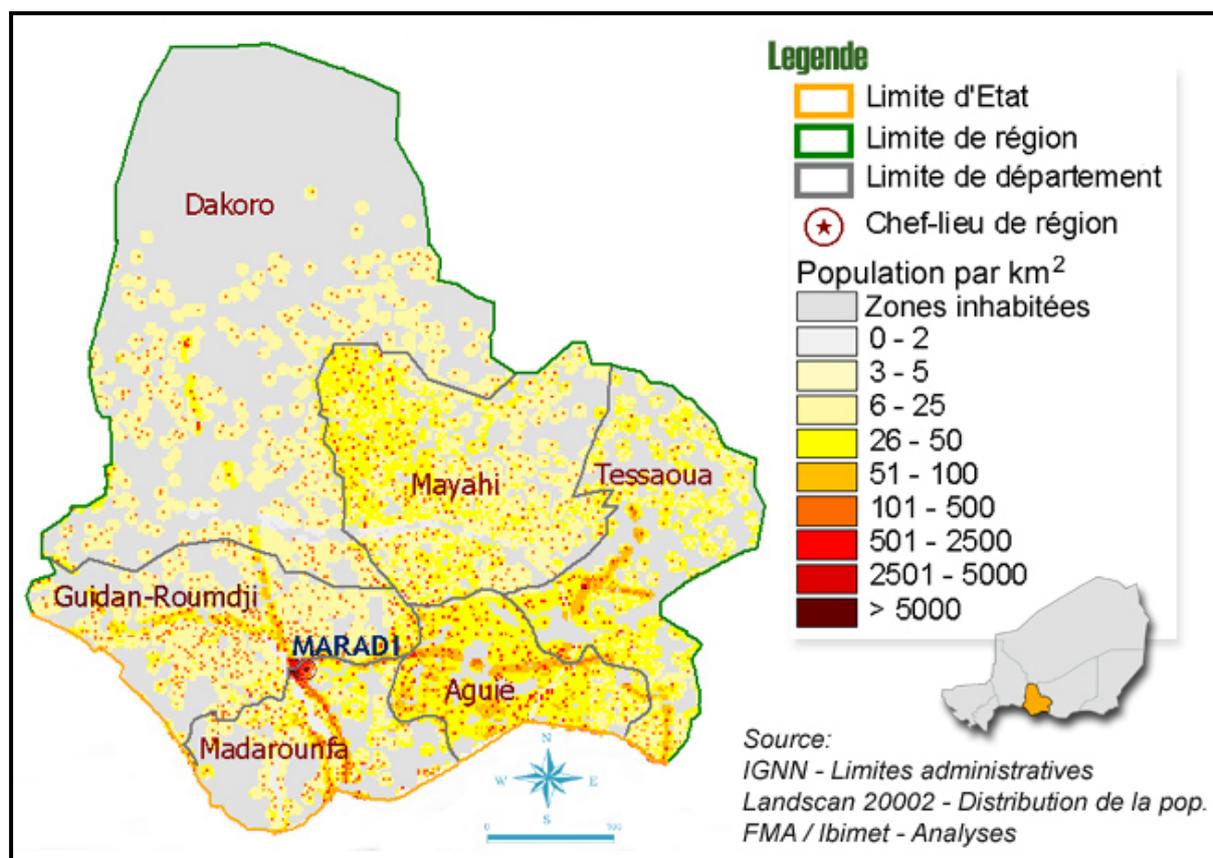
Source: IRH-SIGNER

Annexe 2: Carte géologique de la région de Maradi



Source: DRH/ Mdi

Annexe 3: Carte de la Densité de la population Maradi



Carte de Densité de la population

Annexe 4: Présentation de la structure d'accueil

Attribution du MEE/LCD

Le Ministre de l'Eau, de l'Environnement et de la Lutte Contre la Désertification est chargé, en relation avec les ministres concernés, de l'élaboration et de la mise en œuvre de la politique nationale en matière d'eau, d'assainissement, d'environnement et de lutte contre la désertification conformément aux orientations définies par le Conseil Suprême pour la Restauration de la Démocratie (CSRD).

A ce titre, il exerce les attributions suivantes :

1. la définition et la mise en œuvre des politiques et stratégies dans les domaines de l'eau, de l'assainissement, de la préservation de l'environnement, de la lutte contre la désertification, du changement climatique, de la gestion des déchets et polluants et de la gestion durable des ressources naturelles ;
2. l'élaboration et l'application des textes législatifs et réglementaires en matière d'eau, d'assainissement, d'environnement, de lutte contre les pollutions et nuisances et de gestion durable des ressources forestières, fauniques, halieutiques, apicoles et des zones humides ;
3. l'approvisionnement en eau potable des communautés humaines et du cheptel ;
4. la restauration des terres dégradées, le reboisement, la lutte contre les feux de brousse et les plantes envahissantes, l'aménagement des espaces boisés, le développement de l'agroforesterie, le développement et la valorisation des ressources forestières, fauniques, halieutiques et apicoles ;
5. l'élaboration du plan national de gestion intégrée des ressources en eau (PANGIRE), l'inventaire des ressources hydrauliques et l'établissement de rapports périodiques sur l'état des ressources en eau ;
6. l'élaboration du plan forestier national, la réalisation de l'inventaire forestier national et l'établissement périodique de rapports sur l'état de l'environnement ;
7. l'élaboration et la mise en œuvre des programmes et projets de développement en matière d'eau, d'assainissement, d'environnement et de lutte contre la désertification ;
8. la conservation et la protection des eaux souterraines et de surface, des ressources forestières, fauniques, halieutiques et apicoles en liaison avec les ministères et institutions concernés ;

9. l'information, la sensibilisation et l'encadrement de la population en matière d'eau, d'assainissement, d'environnement et de lutte contre la désertification ;
10. la promotion de la gestion intégrée des ressources en eau, de la gestion durable des terres, de l'éducation et de la communication environnementale en liaison avec les ministères et institutions concernés ;
11. le développement du réseau national d'aires protégées et la promotion de l'élevage non conventionnel de la faune ;
12. la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre des infrastructures hydrauliques et d'assainissement ;
13. le contrôle de l'exploitation des infrastructures hydrauliques et de la gestion des services publics d'alimentation en eau potable en collaboration avec l'Autorité de Régulation Multisectorielle (ARM) ;
14. la réalisation des audits environnementaux, la validation des études d'impact environnemental des projets et programmes de développement et la délivrance des certificats de conformité environnementale ;
15. la conception, la réalisation et le contrôle des études et enquêtes statistiques dans les domaines de l'eau, de l'assainissement, de l'environnement et de la lutte contre la désertification ;
16. l'exercice de la tutelle technique sur les Etablissements Publics, Sociétés d'Etat et Sociétés d'Economie Mixte relevant de son domaine de compétence ;
17. la gestion des relations avec les organismes nationaux intervenant dans son domaine de compétence ;
18. la mise en œuvre et le suivi des conventions et accords internationaux ainsi que leurs mécanismes de financement dont il est point focal politique et opérationnel dans son domaine de compétence;
19. la gestion des relations avec les organisations et institutions internationales intervenant dans son domaine de compétence en relation avec les ministères concernés.

Cadre institutionnel de la gestion de l'eau

Le cadre institutionnel de gestion de l'eau est composé de :

- ✓ l'Etat et les collectivités territoriales ;
- ✓ la Commission Nationale de l'Eau et de l'Assainissement (CNEA) prévue à l'article 25 de l'ordonnancement^o 2010-06 du 1^{er} avril 2010 portant code de l'eau au Niger et les

Commissions Régionales de l'Eau et de l'Assainissement (CREA) ;

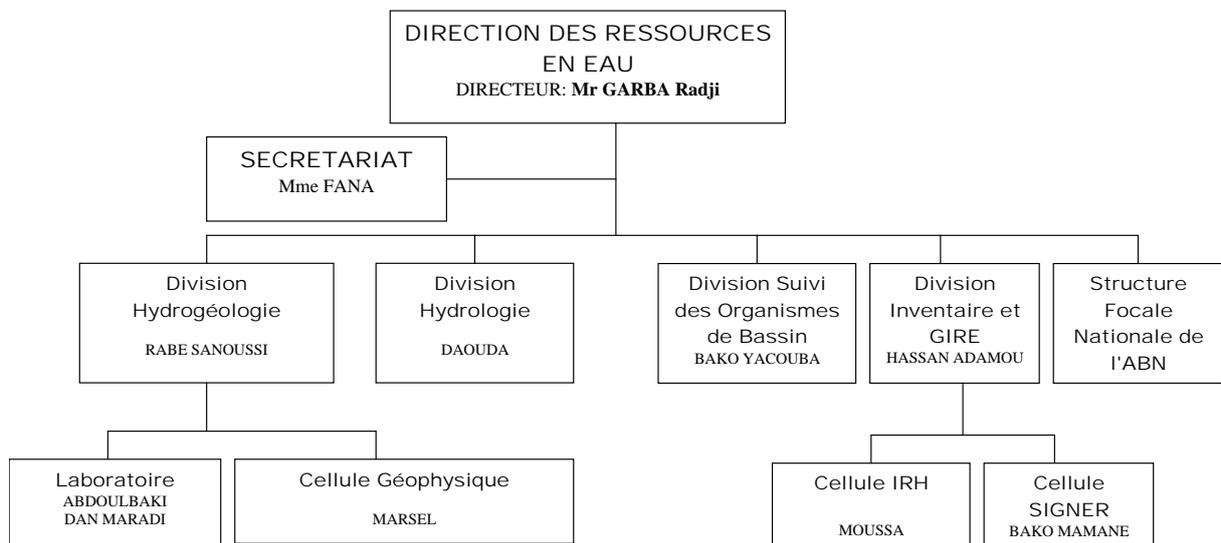
- ✓ les Commissions de Gestion de l'Eau au niveau des UGE ;
- ✓ les organes locaux de gestion de l'eau.

D'autres organes peuvent, en tant que de besoin, être créés par voie réglementaire.

Cellule IRH-SIGNER

Le système d'information géographique pour le Niger "SIGNER" mis au point par le projet PNUD/DAES "Appui au plan eau et développement" et développé comme outil de planification et d'aide à la décision avec le concours du Royaume des Pays-Bas, est opérationnel au niveau central et dans l'ensemble des Directions Départementales de l'Hydraulique.

Organigramme de la DRE du MEE/LCD



Annexe 5: Carte de sensibilité à la pollution des nappes d'eaux souterraines de la région de Maradi

