



IMPACT DE LA RIZICULTURE PERI-URBAINE SUR LA
POLLUTION DES EAUX : CAS DE BOULBI DANS LA
PROVINCE DU KADIOGO AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC
GRADE DE MASTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE (GCH)

OPTION : Infrastructures et Réseaux hydrauliques (IRH)

Présenté et soutenu publiquement le 28 janvier 2021 par :

MANTORO Maanou Rosella Axiane (20140086)

Travaux dirigés par :

Directeur de mémoire : **Pr. Amadou KEITA**, Maitre de conférences, Laboratoire Eaux Hydro-systèmes et Agricultures (LEHSA), Institut 2iE

Encadreur externe : **Dr. Aissata Delphine NATTI / BAMA**, chargée de la Recherche en Hydraulique Agricole, CREAM Kamboinsé/ INERA

Jury d'évaluation du mémoire :

Président du jury : **Pr. Yacouba HAMMA**

Membres et correcteurs : **M. Bassirou BOUBE**

M. Moussa KAFANDO

Promotion [2020/2021]

DEDICACES

*Louange à DIEU tout puissant, le Seigneur de l'univers qui ne m'a
jamais abandonné tout au long de ma vie.*

Je dédie ce mémoire ... ✍

- ❖ *A ma chère mère MANTORO/ OUEDRAOGO Rose qui m'a donnée la vie, elle qui a toujours guidé mes pas, dans la recherche de la réussite et du savoir et qui n'a épargnée aucun effort pour me rendre heureuse.*
- ❖ *A mon cher père MANTORO Accouvi Aubert à qui je dois énormément pour ma réussite, pour tous les efforts, les conseils et l'amour.*
- ❖ *A ma merveilleuse fille Jennah Angelique qui est ma source de motivation.*
- ❖ *A tous (tes) mes amis (es) avec lesquels j'ai passée d'inoubliables moments.*
- ❖ *A toutes ces personnes de près ou de loin, qui ne cessent et continuent de m'accompagner*

Que le seigneur tout puissant vous bénisse !!

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous voulons exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont contribué ou apportés leur aide et leur disponibilité pour l'élaboration de ce document.

De façon particulière nous remercions :

- Toute l'équipe pédagogique et administrative de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE pour la qualité de la formation dont nous avons bénéficiés ;
- Mon directeur de mémoire, **Pr. Amadou KEITA**, pour le précieux temps, et dont les conseils ont contribué à l'accomplissement de ce travail ;
- Le directeur du Centre de Recherches Environnementale, Agricole et de Formation CREAM/INERA, feu **Dr. Korodjouma OUATTARA**, de nous avoir accueilli au sein de la structure ;
- Ma co-directrice de mémoire **Dr. Aissata Delphine NATI/BAMA**, pour sa disponibilité et son encadrement ;
- Le responsable du laboratoire Eaux Hydro - Systèmes et Agricultures (LEHSA), **Prof Yacouba KONATE**, qui a accepté de me recevoir au sein du laboratoire ;
- L'agent de la direction de l'agriculture à BOULBI, **M. YAOGO Abdraman**, pour les conseils et l'accompagnement sur le terrain ;
- Les techniciens supérieurs de laboratoire, Messieurs **Moustapha OUEDRAOGO**, et **Raogo Guy Noel TINDOURE**, pour l'accueil, l'accompagnement et les conseils tout le long du travail au laboratoire d'analyse ;
- Mon compagnon de stage, technicien en agronomie **Jean Hubert DIPAMA**, pour le dévouement l'accompagnement et le soutien ;
- Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

RÉSUMÉ

La présente étude a été menée sur la plaine rizicole de Boulbi dans la province du Kadiogo au Burkina Faso. Notre travail a pour objectif principal, l'évaluation de l'impact des activités culturelles sur la qualité des eaux de la plaine. Pour y arriver, il a d'abord fallu, caractériser la perméabilité du sol et estimer la recharge annuelle de l'aquifère par le bilan de Thornthwaite. Ensuite des investigations ont été menées sur les pratiques d'utilisation des produits phytosanitaires et des engrais. Suivis d'une analyse chimique des eaux de la plaine. Au total Six paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique, Phosphore, Nitrate, Sulfates et Potassium) ont été mesurés. En fin, grâce à l'outil SIG (ARCGIS), la vulnérabilité de la nappe superficielle à la pollution agricole a été cartographiée par les méthodes DRASTIC, GOD et SI. Les essais d'infiltrométrie montrent une conductivité hydraulique moyenne à saturation du sol d'environ 3.05 mm/h traduisant un sol argilo-limoneux. La recharge annuelle est évaluée à environ 68.48 mm soit 7% de la pluie. Les résultats des enquêtes ont mis en évidence l'application d'une vingtaine de produits phytosanitaires (herbicides et insecticides) et engrais chimiques de type NPK et Urée, pour le traitement des champs. L'analyse des 32 échantillons ont permis d'avoir des résultats montrant des niveaux de contamination faible : pH (8,7 - 6,9), Conductivité électrique (271 - 136 $\mu\text{s}/\text{cm}$), Phosphore (0,18 - 0,02 mg/L), Nitrate (34,8 - 1,3 mg/L), Sulfate (3 - 0 mg/L), Potassium (8,88 - 1,66 mg/L). Cependant des fortes corrélations ont été trouvées : 0.92 entre la conductivité et le nitrate dans les eaux souterraines, et 0.79 entre le sulfate et le potassium. L'utilisation des méthodes de cartographie ont révélées des classes de vulnérabilité faible sur toute l'étendue de la plaine, du fait de la nature argileuse du sol et de la topographie plane (0-4%), mais toutefois les risques de contamination dus aux pesticides restent possibles.

Mots Clés :

- 1 – Activités culturelles**
- 2 – Caractérisation physico-chimique**
- 3 – Recharge de l'aquifère**
- 4 – SIG**
- 5 – Vulnérabilité à la pollution**

ABSTRACT

This study was conducted on the Boulbi rice plain in The Province of Kadiogo in Burkina Faso. Our main objective is to assess the impact of cultural activities on the water quality of the plain. To achieve this, it was first necessary to characterize the permeability of the soil and estimate the annual recharge of the aquifer by the Thornthwaite balance sheet. Subsequently, investigations were carried out into the practices of the use of plant protection products and fertilizers. Followed by a chemical analysis of the waters of the plain. Altogether Six physical-chemical parameters (pH, electrical conductivity, phosphorus, nitrate, sulphates and potassium) were measured. In the end, thanks to the GIS tool (ARCGIS), the vulnerability of the surface table to agricultural pollution was mapped by the drastic, GOD and SI methods. Infiltrometry tests show an average soil saturation hydraulic conductivity of about 3.05 mm/h reflecting clay-limestone soil. The annual recharge is estimated at about 68.48 mm or 7% of the rain. The results of the surveys revealed the application of about 20 phytosanitary products (herbicides and insecticides) and chemical fertilizers such as NPK and Urea, for the treatment of fields. Analysis of the 32 samples resulted in results showing low levels of contamination: pH (8.7 - 6.9), Conductivity (271 - 136 μ S/cm), Phosphorus (0.18 - 0.02 mg/L), Nitrate (34.8 - 1.3 mg/L), Sulphate (3 - 0 mg/L), Potassium (8.88 - 1.66 mg/L). However strong correlations were found: 0.92 between conductivity and nitrate in groundwater, and 0.79 between sulphate and potassium. The use of mapping methods revealed low-vulnerability classes throughout the plain, due to the clay nature of the soil and flat topography (0-4%), but the risks of pesticide contamination remain possible.

Key words:

- 1 - Cultural activities**
- 2 - Physical-chemical characterization**
- 3 - Recharge of the aquifer**
- 4 - GIS**
- 5 - Vulnerability to pollution**

LISTE DES ABREVIATIONS

- **2iE** : Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
- **INERA** : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
- **CREAF** : Centre de Recherches Environnementale, Agricole et de Formation
- **LEHSA** : Laboratoire Eaux-Hydro-systèmes et Agriculture
- **SNDR** : Stratégie Nationale de Développement de la Riziculture
- **DGPER** : Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale
- **ODD** : Objectifs du Développement Durable
- **FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
- **IGB** : Institut Géographique du Burkina Faso
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **Ksat** : Conductivité hydraulique à saturation
- **ET_o** : Evapotranspiration de Référence
- **ETR** : Evapotranspiration réelle
- **ETP** : Evapotranspiration potentielle
- **RFU** : Réserve Facilement Utilisable
- **RU** : Réserve Utile
- **CE** : conductivité
- **N**: Azote
- **NO₃⁻** : Nitrate
- **NKT** : Engrais de type NTK
- **PO₄³⁻** : Ortho Phosphate
- **SO₄²⁻** : Sulfate
- **K** : Potassium
- **SWC** : Soil Water Characteristics
- **SPAW**: Soil Plant Air Water

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES PHOTOS	ix
I. INTRODUCTION	1
I.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE.....	1
I.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE	2
I.3. STRUCTURATION DU MEMOIRE.....	2
II. GENERALITES	3
II.1 NOTION SUR LA POLLUTION	3
II.1.1 Principaux polluants des eaux	3
II.1.2 Les pesticides et les matières fertilisantes (engrais).....	4
II.2. DIFFERENTS TYPES DE PESTICIDES ET D'ENGRAIS UTILISES DANS L'AGRICULTURE BURKINABE.....	7
II.3. COMPORTEMENT ET DEVENIR DES PESTICIDES DANS L'ENVIRONNEMENT	7
II.4. LEGISLATION ET REGLEMENTATION DES PESTICIDES ET ENGRAIS AU BURKINA FASO	8
III. MATERIELS ET METHODES	9
III.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	9
1. Historique et Situation géographique.....	9
2. Caractéristiques du milieu naturel	10

III.2. MATERIELS UTILISES	13
III.3 METHODOLOGIE UTILISEE	14
III.3.1 Caractérisation des paramètres hydrodynamiques du sol	14
III.3.3 Méthodes de cartographie de la vulnérabilité a la pollution	18
III.3.4 Détermination des paramètres physico-chimique des eaux	27
IV. RESULTATS ET DISCUSSION	30
IV.1 Caractérisation des paramètres hydrodynamiques du sol	30
IV.2 Evaluation de la ressource en eau souterraine.....	31
IV.3 Méthodes de cartographie de la vulnérabilité a la pollution	32
IV.4 Détermination des caractéristiques physico-chimiques des eaux collectées.....	41
CONCLUSION	50
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATION	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
ANNEXES	I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Les familles chimiques des produits phytosanitaires (Chi Anh Ta, 1997)	5
Tableau II.Poids des paramètres DRASTIC (ALLER et AL, 1987).....	21
Tableau III. Classification des indices de vulnérabilité DRASTIC (ALLER et AL,1987)	22
Tableau IV.Classification des indices DRASTIC sur l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique (JOUDA et AL, 2007).....	22
Tableau V. Cotes des paramètres de vulnérabilité par GOD (ALLER et AL, 1987).....	23
Tableau VI.Classification des indices de vulnérabilité GOD (ALLER et AL, 1987).....	24
Tableau VII.Cotes et poids des paramètres de vulnérabilité SI (KHEMIRI et AL,2013)	25
Tableau VIIIAprès le calcul de l'indice de susceptibilité, le degré de vulnérabilité se définit suivant le (Tableau 8) ci-dessous :	25
Tableau IX.Classification des indices de vulnérabilité SI (KHEMIRI et AL, 2013).....	26
Tableau X.Indices affectés aux différentes classes de vulnérabilité.....	26
Tableau XI. Liste des paramètres analysés et des méthodes appliquées.....	29
Tableau XII. Résultat des mesures d'infiltration	30
Tableau XIII.Paramètres du bilan de Thornthwaite pour l'estimation de la recharge annuelle	32
Tableau XIV. Cotes obtenues par chaque paramètre pour les trois méthodes de vulnérabilité	36
Tableau XV.Pourcentages des surfaces selon le degré de vulnérabilité	40
Tableau XVI.Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de puits (nappe cuirassée noyée)	41
Tableau XVII.Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de surface.....	41
Tableau XVIII.Matrice de corrélation des eaux souterraines.....	47
Tableau XIX.Matrice de corrélation des eaux de surface	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1.Comportement des pesticides dans l'environnement (BERRAH, 2011)	8
Figure 2.Situation géographique de la zone d'étude.....	9
Figure 3.Variation de la pluviométrie annuelle de KOMSILGA de 2009 à 2019	10
Figure 4.Carte hydrographique de la zone d'étude	11
Figure 5. Carte des points de mesure d'infiltration par le double anneau	15
Figure 6.Schema conceptuel du bilan de Thornthwaite (DAKOURE,2003).....	16
Figure 8.Carte pédologique de la plaine de Boulbi	31
Figure 10.Emballage de pesticide abandonné sur la plaine	34
Figure 11.Carte de vulnérabilité a la pollution agricole par la méthode DRASTIC	37
Figure 12.Carte de vulnérabilité à la pollution agricole par la méthode GOD	38
Figure 13.Carte de vulnérabilité à la pollution agricole par la méthode SI.....	39
Figure 14.Evolution du pH au niveau des points de prélèvement.....	42
Figure 15.Evolution de la CE au niveau de chaque point de prélèvement.....	43
Figure 16.Evolution du nitrate au niveau de chaque point de prélèvement	44
Figure 17.Evolution du sulfate au niveau de chaque point de prélèvement.....	45
Figure 18.Evolution de l'ortho-phosphate au niveau de chaque point de prélèvement.....	46
Figure 19.Evolution du potassium au niveau de chaque point de prélèvement	46

LISTE DES PHOTOS

Photo 1.Mesure d'infiltration avec le double anneau.....	14
Photo 2.Echantillonnage des eaux pour les analyses	27
Photo 3.Photos de quelques types de pesticides utilisés dans la zone d'étude	34

I. INTRODUCTION

I.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Situé dans la boucle du Niger, le Burkina Faso est un pays continental d'environ 274 200 km², sans débouchée maritime, à vocation agropastorale dont l'économie est fortement tributaire de l'agriculture. Elle occupe plus de la moitié de la population active, contribuant à environ 33% du produit intérieur brut et assure plus de 85 % des recettes d'exportation (SNDR, 2011). Le riz quatrième céréale cultivée au Burkina Faso représente un fort potentiel en terres aménageables, mais sa production demeure faible et ne couvre que 47% des besoins du pays en riz (DGPER, 2012). Dans le but d'atteindre l'auto-suffisance alimentaire, et de lutter contre la pauvreté, objectif II des ODD, l'agriculture urbaine et périurbaine constitue pour les pays en voie de développement un secteur d'activité particulièrement intéressant. En effet l'agriculture urbaine et périurbaine se rapporte généralement à la satisfaction des besoins des populations urbaines à partir de ressources localement disponibles. La caractéristique la plus frappante de l'agriculture urbaine, qui la distingue de l'agriculture rurale, est qu'elle est intégrée dans le tissu économique et écologique urbain (MOUGEOT, 2000). Dans les périphéries de Ouagadougou, l'agriculture occupe une dimension socio-économique importante depuis les années 1970. En effet Ouagadougou présente un taux de croissance annuelle moyen de 7.6 %, cette croissance démographique en lien avec les politiques de gestion foncière constitue une des variables expliquant ce boom démographique autour de la ville de Ouagadougou. La pratique de l'agriculture, entraîne l'utilisation des produits chimiques et fertilisant agricole pour accroître la production agricole, lutter contre les ravageurs et les mauvaises herbes, mais ces produits chimiques entraînent des conséquences néfastes sur l'environnement et sur la santé de l'homme. En effet le Burkina Faso, est confronté à la problématique de la pollution de ses eaux de surfaces et souterraines. L'usage intensif des engrais et des pesticides est devenu une nécessité pour améliorer les rendements et la qualité des récoltes. Face à cette situation des études méritent d'être effectuées afin de proposer des solutions qui répondront d'une part à l'atteinte de l'auto-suffisance alimentaire et d'autre part à la protection de l'environnement. C'est dans ce cadre que notre étude portant sur « Impact de la riziculture péri-urbaine sur la pollution des eaux, cas de Boulbi » a été menée dans le but d'évaluer de l'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux, et de déterminer la vulnérabilité de la pollution d'origine agricole sur cette plaine rizicole.

I.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif général de cette étude est de contribuer à l'amélioration des connaissances sur l'impact de la riziculture péri-urbaine sur la pollution des eaux de la plaine de Boulbi, situé en périphérie de la ville de Ouagadougou.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Identifier les différents types de produits phytosanitaires et intrants utilisés dans la zone d'étude ;
- Déterminer les paramètres hydrodynamiques du sol, et la recharge de l'aquifère ;
- Réaliser une caractérisation physico-chimique des eaux de la plaine de Boulbi ;
- Elaborer les différentes cartes de vulnérabilité à la pollution agricole ;
- Comparer les méthodes de cartographie de caractérisation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution.

I.3. STRUCTURATION DU MEMOIRE

Ce mémoire sera articulé autour de trois (3) grandes parties :

- ❖ La partie I porte sur les généralités ;
- ❖ La partie II est d'abord consacrée à la présentation de la zone d'étude puis aux matériel et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution.
- ❖ La partie III présente les résultats obtenus suivis de la discussion ;

Une conclusion et des perspectives terminent cette étude.

II. GENERALITES

II.1 NOTION SUR LA POLLUTION

La pollution est définie comme toute modification défavorable des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ou comme tout rejet de substances liquides, gazeuses ou solides dans l'eau de façon à créer une nuisance ou à rendre cette eau dangereuse. La pollution de l'eau est essentiellement due aux activités humaines et aux phénomènes naturels. L'ensemble des polluants parviennent au milieu naturel de deux manières : par des rejets bien localisés ou par des rejets diffus. L'introduction de polluants dans le sous-sol provoque une pollution des eaux souterraines qui se caractérise par une propagation lente et durable et une grande difficulté de résorption ou de traitement (CHAOUKI, 2016-2017).

II.1.1 Principaux polluants des eaux

En fonction de la répartition géographique on distingue deux types de pollution : la diffuse et la ponctuelle. Les principaux polluants pouvant se retrouver dans les eaux sont les suivants :

- **Les matières en suspension** : représentent toutes les substances minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau qui peuvent entraîner un ralentissement de la photosynthèse.
- **Les sels minéraux** : ils sont présents naturellement dans l'eau mais leur présence en quantité élevée peut nuire à la biologie aquatique.
- **Les matières organiques** : ensemble de déchets carbonés provoquant la prolifération des micro-organismes dans l'eau, entraînant une diminution de l'oxygène qui est très fatale pour la vie aquatique.
- **Les métaux lourds** : comme le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le plomb (Pb), le fer (Fe), le nickel (Ni), le zinc (Zn) et le chrome (Cr) très toxiques, qui ne se dégradent généralement pas dans l'environnement.
- **Les pesticides** : qui constituent un problème majeur pour l'environnement, en effet ils peuvent avoir des répercussions sur l'eau, le sol, la plante et aussi l'Homme.
- **Les matières fertilisantes (les engrais)** : comme le phosphore et l'azote retrouvés en quantité énorme dans les eaux peuvent par exemple entraîner une prolifération d'algues et constitue une pollution d'origine biologique des eaux (CHAOUKI, 2016-2017).

II.1.2 Les pesticides et les matières fertilisantes (engrais)

❖ LES PESTICIDES

La Directive 91/414/CE transposée en droit français par le décret 94-359 du 5 mai 1994 qui concerne la mise sur le marché des produits phytosanitaires, on distingue les pesticides utilisés essentiellement pour la protection des végétaux que l'on appelle communément les produits phytopharmaceutiques, et d'autres appelés biocides (défini dans Directive 98/8/CE) comme étant des produits utilisés pour la protection des animaux domestiques ou des éléments de construction (charpente). Un pesticide est un produit chimique composé d'une ou de plusieurs matières actives et d'adjuvants pouvant être du talc sous forme de poudre ou du distillat de pétrole sous forme de concentré émulsionnable, destinés à accompagner les effets des substances actives, qui peut être de l'argile ou de la cellulose (CAMARD & AL, 2010). Les pesticides sont généralement classés en fonction de leur cible :

- Les insecticides (lutte contre les insectes) ;
- Les herbicides (lutte contre les mauvaises herbes) ;
- Les acaricides (lutte contre les acariens) ;
- Les fongicides (lutte contre les champignons indésirables et les maladies bactériennes) et d'autres catégories moins souvent évoquées.

Les pesticides sont présents dans presque tous les milieux de l'environnement, à savoir : les eaux de surface, les eaux souterraines, l'air ambiant, la poussière, le sol, le brouillard, la pluie, et la glace. Les pesticides sont diffusés partout, car les résidus de pesticides ont été trouvés dans plus de 70 % des fruits et légumes, plus de 60 % des échantillons de blé et de 99% pour cent de lait, ils sont également présents dans les organes de presque tous les adultes et les enfants. (BERRAH, 2011)

Propriétés physiques et chimiques des pesticides

Selon leurs natures chimiques, il existe trois catégories de pesticides : les pesticides inorganiques (dérivé de minéraux comme le cuivre, les sels, le soufre, etc.), les pesticides organométalliques et les pesticides organiques (dont les pesticides organiques naturels et les pesticides organiques de synthèse), (DIOP, 2013). Le *Tableau I* présente les familles chimiques des produits phytosanitaires.

Tableau I. Les familles chimiques des produits phytosanitaires (CHI ANH TA, 1997)

	Famille chimiques		Famille chimiques
HERBICIDES	Urées substituées	INSECTICIDES	Organochlorés
	Carbamates et Thio carbamates		Organophosphorés
	Dérivés d'hétérocycles azotés		Carbamates
	Phénols		Pyréthroïdes de synthèse
	Acides phénoxyalcanoïques		Phéromones et analogue
	Acides benzoïques		Insecticides extrait de plantes
	Dinitroanilines		Analogues d'hormones juvéniles

❖ **LES ENGRAIS**

Les engrais sont des substances organiques ou minérales, le plus souvent utilisées en mélange, destinés à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs de façon à améliorer leur croissance et augmenter le rendement et la qualité des cultures, (TOE A. , 2007). Tout produit contenant au moins 5% ou plus de l'un ou plus des trois principaux éléments nutritifs des plantes (N, P₂O₅, K₂O), fabriquées ou d'origine naturelle, peut être appelé engrais.

Il existe trois grands types d'engrais chimiques :

- **Les engrais organiques** : leur origine est animale ou végétale ou sous sa forme synthétisée (urée par exemple) et ils sont principalement composés de déchets industriels comme les déchets d'abattoirs (sang desséché, corne torréfiée, déchets des poissons, boues).
- **Les engrais minéraux** : d'origine minérale, ils sont produits soit par l'industrie chimique, soit par l'exploitation de gisement naturel (Phosphate, potasse). Nous retrouvons l'azote N, apporté soit sous forme de nitrate NO₃⁻, d'ammoniaque NH₄⁺ ou d'urée. Le phosphore est exprimé sous la forme P₂O₅ et apporté sous forme de phosphates de calcium ou d'ammonium. Quant au potassium, il est apporté par du chlorure, du nitrate et du sulfate de potassium mais exprimé sous la forme d'hydroxyde de potassium K₂O.

- **Les engrais organo-minéraux** : Ils proviennent du mélange d'engrais minéral et d'engrais organique. Les matières organiques azotées représentent généralement 25 à 50 % des produits finis. Les autres constituants du fertilisant sont dilués dans les matières organiques.

Rôles des différents éléments nutritifs de base

- **L'Azote (N)** : il figure parmi les intrants agricoles dont l'utilisation a fortement progressé. Elle constitue, après l'eau, l'un des facteurs limitant le plus important de la production végétale (RECOUS & et AL, 1995). L'azote joue aussi un rôle essentiel dans la photosynthèse en permettant la transformation de la matière minérale de la plante en tissu végétal. L'azote organique (résidus des récoltes précédentes, engrais organiques etc.) est transformé par les micro-organismes présents dans le sol en nitrates pour être utilisable par les plantes : c'est la minéralisation. Ce sont essentiellement les nitrates qui assurent la nutrition azotée des plantes. Son cycle dépend des conditions climatiques et de la microbiologie du sol (OKOUNDE, 2006).
- **Le Phosphore (P)** : tout en transportant l'énergie à la plante, il favorise sa croissance générale, notamment celui du système racinaire et des tiges. Sans phosphore, il n'y a pas de photosynthèse, la plante ne peut plus respirer ni dupliquer son patrimoine génétique. En cas de carence en phosphore, la plante ralentit ou cesse toute croissance jusqu'à la mort. Le phosphore se trouve le plus souvent dans les roches sous des formes totalement inutilisables. Les plantes s'alimentent essentiellement à partir du phosphore, des matières organiques du sol ou des engrais minéraux (CAROLINE & et AL, 2015).
- **Le Potassium (K)** : il permet à la plante d'avoir une croissance équilibrée et renforce la résistance aux maladies et à la sécheresse en limitant la transpiration. Sa carence comme son excès augmente la sensibilité des plantes aux parasites. Il joue aussi un rôle primordial dans la formation et le stockage des sucres au niveau de la plante. Le potassium de la solution du sol est retenu par l'humus ou l'argile ; celui contenu dans les minéraux ne sera libéré que très lentement. Comme pour le phosphore, le cycle du potassium est dépendant des caractéristiques physiques et chimiques du sol (OKOUNDE, 2006).

II.2. DIFFERENTS TYPES DE PESTICIDES ET D'ENGRAIS UTILISES DANS L'AGRICULTURE BURKINABE

Le niveau d'utilisation des engrais chimique utilisée dans l'agriculture burkinabé demeure faible, s'établissant en moyenne à 15 kg de NPK et d'urée par hectare de terre cultivée ; comparativement à la moyenne mondiale qui est d'environ 85 kg/ha, (AQUASTAT, 2015). Nos enquêtes menées sur la plaine de Boulbi ont montré que les riziculteurs utilisent majoritairement des engrais de type NPK 14-23-14, et de l'urée à 46%. Des résultats similaires ont été trouvés par (OKOUNDE, 2006), autour du périmètre de Mogtédou, montrant que les coopératives de rizicole et de maraîchère de la région, utilisent des engrais de types NKP14-23-14 et NKPSB14-19-14+6S+1B2O3 et de l'urée à 46% de proportion.

Tout comme l'engrais l'utilisation des pesticides dans l'agriculture demeure faible et 85% sont destinés à la production du coton. Les plus utilisés dans l'agriculture sont pour la plupart des insecticides et des herbicides. Une étude menée par l'IFDC en 2006 dans certaines localités du Burkina Faso (Ouagadougou, Ouahigouya et Bobo Dioulasso) sur les produits phytosanitaires utilisés en maraîchage a montré que 60% des pesticides destinés à la protection du coton sont utilisés en maraîchage, et 43% de ces produits ne figurent pas sur la liste des produits homologués par le Comité sahélien des pesticides (DJIBO HAHIOU, 2020).

II.3. COMPORTEMENT ET DEVENIR DES PESTICIDES DANS L'ENVIRONNEMENT

Dès qu'ils ont atteint le sol ou la plante, les pesticides commencent à disparaître, ils sont dégradés ou sont dispersés. En effet, les matières actives peuvent se volatiliser dans l'atmosphère, ruisseler vers les eaux de surface ou être lessivées (infiltration) et atteindre les eaux souterraines. Elles peuvent être également absorbées par des plantes ou des organismes du sol ou adsorbées par les particules du sol. Le ruissellement emporte en moyenne 2% d'un pesticide appliqué sur le sol, rarement plus de 5 à 10% (LEONARD & CHENG, 1990).

L'eau peut entraîner la dispersion des pesticides dans le milieu par lavage des feuilles, ruissellement et lixiviation. Le ruissellement contribue à la pollution des eaux de surface tandis que la lixiviation contribue surtout à celle des eaux profondes (VAN DER WERF, 1997). Bien qu'on considère souvent séparément les eaux de surface et les eaux souterraines, elles sont liées presque partout par le cycle hydrologique. En fonction des gradients hydrauliques c'est l'eau de surface qui alimente les aquifères ou les aquifères qui alimentent les eaux de surface. En

conséquence, les taux de pesticides dans les eaux superficielles pourront affecter les eaux souterraines ou dépendre d'elles, (LEONARD & CHENG, 1990).

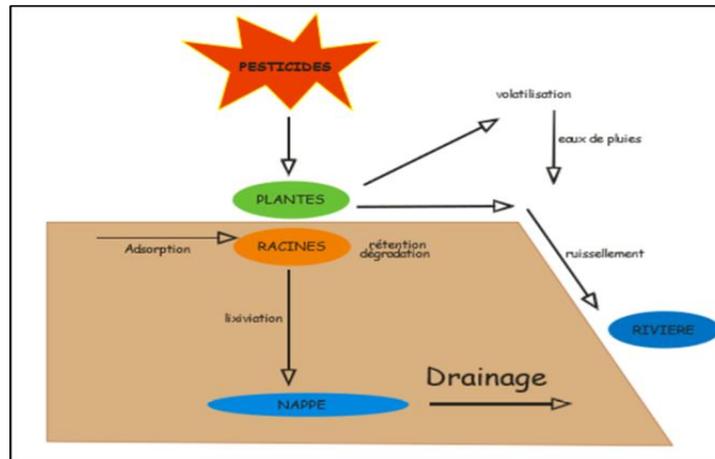


Figure 1. Comportement des pesticides dans l'environnement (BERRAH, 2011)

II.4. LEGISLATION ET REGLEMENTATION DES PESTICIDES ET ENGRAIS AU BURKINA FASO

Conformément à la réglementation commune aux états membres du CILSS sur l'homologation des pesticides (CILSS, 1999), le Burkina Faso, tout comme les autres pays du CILSS ne doit pas disposer d'une structure autonome d'homologation des pesticides. Les opérations d'homologation sont assurées par le Comité Sahélien des Pesticides, secrétariat d'exécution du CILSS. Aucun pesticide ne peut être vendu ni utilisé au Burkina Faso tant qu'il n'est pas autorisé par le CSP. A cet effet, le Burkina Faso a créé en août 2000, une Commission Nationale de Contrôle des Pesticides (CNCP) chargée d'appliquer au niveau national les décisions du CSP à l'issue de ses sessions. Elle est placée sous la tutelle du ministère en charge de l'agriculture. Le CNCP est vraiment devenue fonctionnelle qu'en 2007.

En ce qui concerne les engrais, le Burkina Faso dispose depuis 2007 de la loi 026, qui prescrit la qualité des engrais admis dans le pays et qui prévoit des sanctions contre des contrevenants. Le gouvernement a pris des mesures pour non seulement faciliter leur accès aux agriculteurs, mais surtout garantir leur qualité, d'où la création de la Commission nationale de contrôle des engrais (CONACE), le 28 octobre 2016. Cet organe a vu le jour à la suite de l'adoption du règlement commun relatif au contrôle de qualité des engrais dans l'espace CEDEAO en 2012 à Abidjan par les États membres.

III. MATERIELS ET METHODES

III.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Historique et Situation géographique

La plaine de Boulbi est vieille de plus de 50 ans, elle fut aménagée en 1960 par la Chine Taïwan principalement pour la production de riz. La plaine couvre une superficie emblavée de 85ha soit 75 ha exploitables, divisée en sept (7) blocs et 10ha occupées par les ouvrages hydrauliques. La zone d'étude est située dans la région du centre, province du Kadiogo au Burkina Faso. La plaine de Boulbi se situe dans la localité de Kieryaoghin, communément appelé Boulbi (latitude 12°14'01,63'' Nord et longitude de -1°31'52,33'' Ouest) qui est l'un des 36 villages constituant la commune de Komsilga. Elle est accessible à partir de la Route Nationale N6, à environ 25 km au sud de la ville de Ouagadougou, (PCD, 2013).

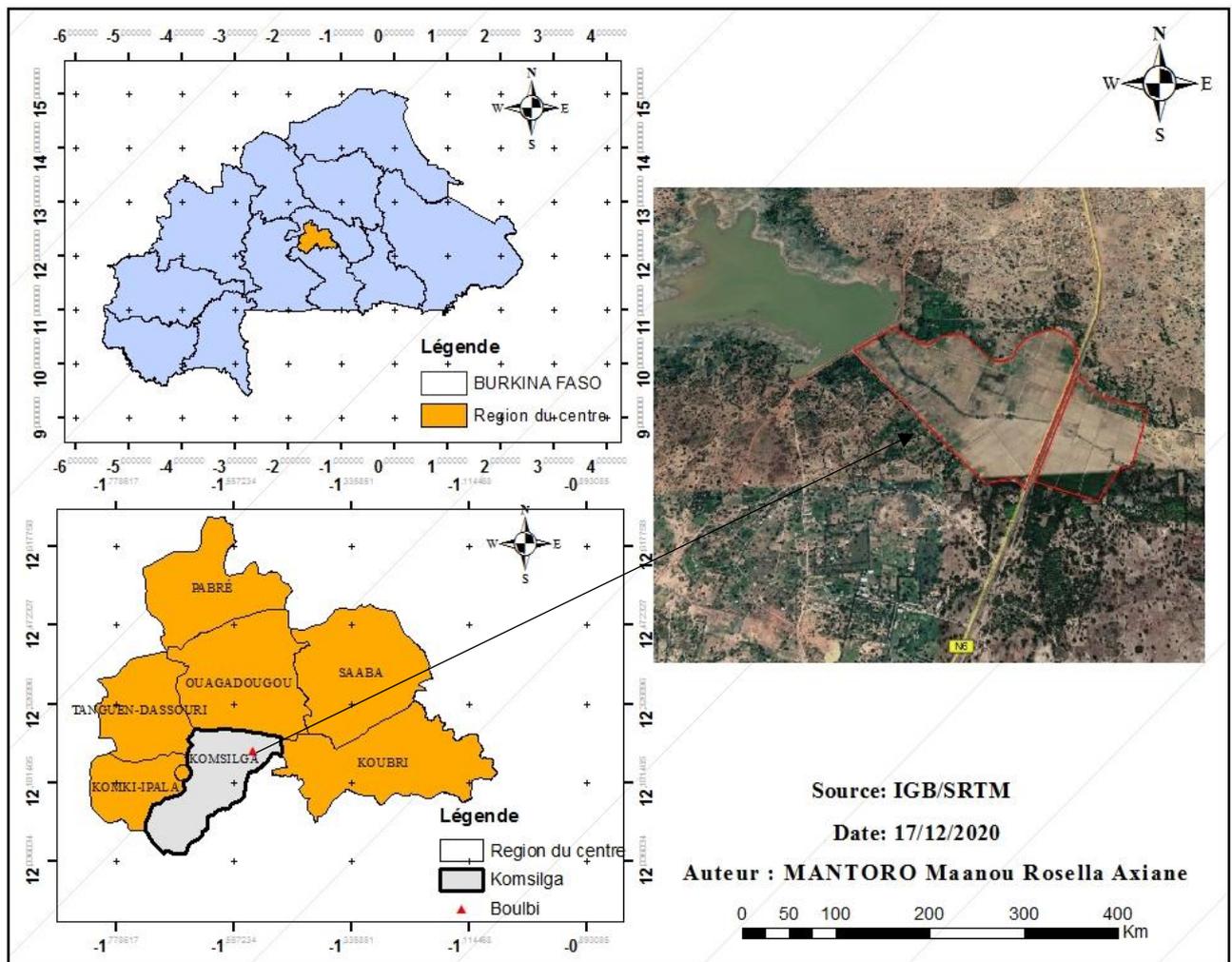


Figure 2. Situation géographique de la zone d'étude

2. Caractéristiques du milieu naturel

a) Le climat

La zone d'étude est couverte par un climat tropical de type soudano-sahélien, avec une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 700 mm. Le climat est caractérisé par deux saisons : La saison sèche qui s'étend de mi-octobre à la mi-mai approximativement caractérisée par un temps chaud, sec et parfois des vents de poussière et la saison des pluies qui va de fin mai à fin septembre, marquée par un flux de sud-ouest appelé la Mousson. Les données pluviométriques recueillis à la station pluviométrique de Komsilga montrent que la moyenne pluviométrique entre 2010 et 2019 s'élève à 783.06 mm. Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 19° et 42°, (MARHASA, 2015).

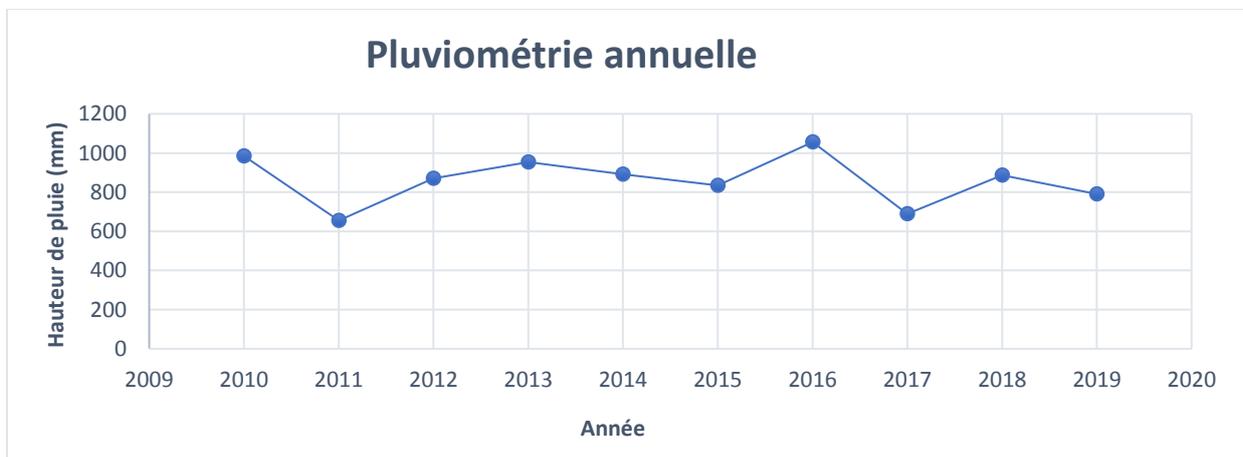


Figure 3. Variation de la pluviométrie annuelle de KOMSILGA de 2009 à 2019

b) Contexte hydrographique

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est présenté par le sous bassin du Nakambé : le Nariarlé. Du centre au sud du pays, le bassin du Nakambé concentre la moitié de la population nationale, 90% de la demande en eau du pays et la moitié des ouvrages de rétention des eaux de surface y sont recensés. Le Nariarlé est un affluent important qui conflue avec le Massili avant de rejoindre le Nakambé en rive gauche. Le bassin versant du Nariarlé occupe une superficie de 1000 km². Il est caractérisé par un dénivelé d'une centaine de mètres, une largeur moyenne du nord au sud de 25km et une longueur d'est en ouest de 50km. La densité de population (75 hab./km²) y est très supérieure à la moyenne nationale (50hab./km²), (MOIROUX, 2006).

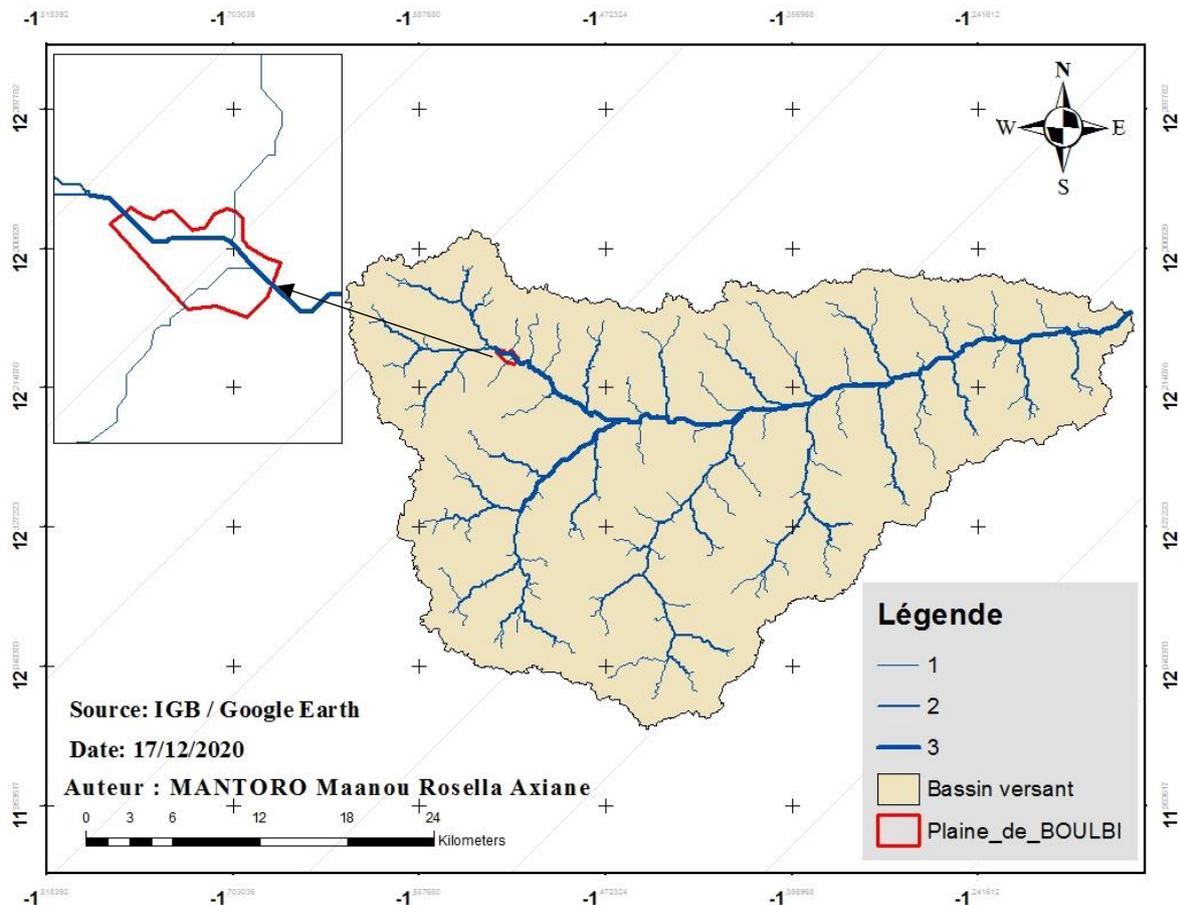


Figure 4. Carte hydrographique de la zone d'étude

c) *Le relief et les sols*

Le relief est caractérisé par des altitudes comprises entre 280 m et 300 m. Les Trois principales unités morphologiques se distinguent par : un glacis fonctionnel, un niveau cuirassé offrant des possibilités d'exploitation d'agglomérats pour les travaux de construction de routes et la dernière est celle des bas-fonds et des plans d'eau qui offrent des possibilités d'aménagement, à des fins agricoles (BNDT, GRADE, mai 2013). Selon la carte des sols de la commune de Komsilga, nous retrouvons trois (03) types de sols :

- Les sols hydromorphes sur matériaux alluviaux divers ;
- Les sols hydromorphes sur matériaux sablo-argileux bigarré, couvrant avec sols hydromorphes sur matériaux alluviaux divers environ 85% de la commune ;
- Les sols minéraux bruts sur cuirasse ferrugineuse couvrant 3% de la commune ;
- Les sols peu évolués sur matériaux gravillonnaires.

d) L'occupation des terres de la plaine de Boulbi

Les terres de la plaine de Boulbi sont essentiellement dédiées à la culture du riz en saison de pluie. Elles sont exploitées par les riverains de la zone et des villages voisins. Pendant la saison sèche par manque d'eau dans le barrage, le périmètre est uniquement exploité pour les cultures maraichères, en utilisant des puits traditionnels pour l'exploitation des ressources en eau souterraine. Pendant la saison pluvieuse il n'y a que 75 ha qui sont exploités pour la culture du riz car les 10ha ne sont pas dominés par les eaux. Les besoins en eaux pour l'agriculture proviennent essentiellement du barrage de Boulbi.

e) Contexte géologique et hydrogéologique

La géologie de la zone d'étude est présentée par un **ensemble cristallin** d'âge de Précambrien D (Antébirrimien). L'Antébirrimien, est constitué par des gneiss, gneiss granitisés ou migmatites, gabbro et granites, formant le sous-sol de la zone (IWACO, 1993).

Les formations de socle du bouclier africain sont de nature très compacte, avec une porosité et une perméabilité faible donc naturellement dépourvues de ressources en eau souterraine mobilisables. On y distingue, d'une part, l'aquifère supérieur libre de la cuirasse latéritique, capté par les puits et, d'autre part, isolé à son toit par des altérites argileuses, l'aquifère inférieur, souvent captif, constitué par les arènes grenues et le socle cristallin fissuré ou fracturé sous-jacent, capté par les forages. De manière générale, les aquifères du socle cristallin peuvent être ramenés à deux schémas type distinguant les formations granitiques et les schistes, (OUANDAOGO, 2008). Les aquifères des formations granitoïdes se déclinent en deux sous-ensembles :

- **Les granitoïdes précoces** qui sont caractérisés par un faible recouvrement d'altérites, avec de nombreuses fractures ou le taux de succès de forages positifs avec des débits élevés sont très souvent observés.
- **Les granitoïdes tardifs** constitués d'une épaisseur de la couche altérée très importante, présentant peu de fracture donc un faible potentiel pour les ressources en eau souterraines. Cette description est typique de la commune de Komsilga où se trouve notre zone d'étude, (TRAORE, 2010).

Le système aquifère de la zone du socle est constitué de trois systèmes aquifères superposés, qui sont du bas vers le haut : les aquifères du milieu fissuré ; les aquifères de la zone altérée et les aquifères des latérites (IWACO, 1993).

III.2. MATERIELS UTILISES

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisés des données, matériels et outils suivants :

Les différentes données utilisées sont :

- Les données pluviométriques de la station pluviométrique de Komsilga situé à 10 km de notre site sur une période de 2009 à 2019 pour le calcul de la pluie efficace ;
- Les logs de forages réalisés à proximité de la zone d'étude ;
- Les données du niveau statique des eaux de puits sur la plaine ;
- Le questionnaire de l'enquête terrain

Les matériels utilisés sont les suivants :

- Deux (2) infiltromètres (Double anneau) de Muntz ;
- Un (1) GPS Garmin pour la prise des coordonnées ;
- Un (1) seau, une (1) règle, un (1) chronomètre, un (1) marteau et un (1) niveau à bulle pour les mesures d'infiltration ;
- Un mètre pour la mesure de la profondeur de la nappe ;
- Des bidons de 0.5 litres en plastique pour le prélèvement des eaux ;
- Une glacière pour le transport des échantillons au laboratoire ;

Les outils informatiques utilisés sont énumérés ci-dessous :

- **MINITAB 18** pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation ;
- **Soil Water Characteristics** pour la détermination des humidités caractéristiques du sol et les types de sol ;
- **Pack office 2016** pour le traitement des données et la rédaction ;
- **Google Earth** pour la délimitation du site d'étude ;
- **Global Mapper 16** pour la transformation des fichiers KMZ en Shapefile ;
- **ARCGIS 10.3.1** pour la réalisation des cartes (zone d'étude, piézométrie, vulnérabilité à la pollution, etc...).

III.3 METHODOLOGIE UTILISEE

III.3.1 Caractérisation des paramètres hydrodynamiques du sol

Le but de cette caractérisation est de déterminer les différents types de sols qui se trouvent sur la plaine de Boulbi ainsi que la réserve utile. Il s'agit d'effectuer des mesures d'infiltration in-situ sur le terrain.

❖ **Mesure d'infiltration : Doubles anneaux de type Muntz**

C'est un essai qui se réalise in-situ ; il permet de déterminer la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Les deux anneaux (*Photo 1*) sont enfoncés de façon concentrique, en utilisant la planche et le marteau, à une profondeur d'environ 5 cm dans le sol. Le principe est de suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau central. L'anneau externe est appelé « anneau de garde » et a pour fonction de garantir une infiltration verticale dans l'anneau central. Une fois le dispositif mis en place, on les remplit d'une lame d'eau convenable, en commençant par l'anneau externe. Le chronomètre est ensuite lancé et on mesure les baisses de niveau d'eau en fonction du temps (KEITA, 2008-2018).



Photo 1. Mesure d'infiltration avec le double anneau

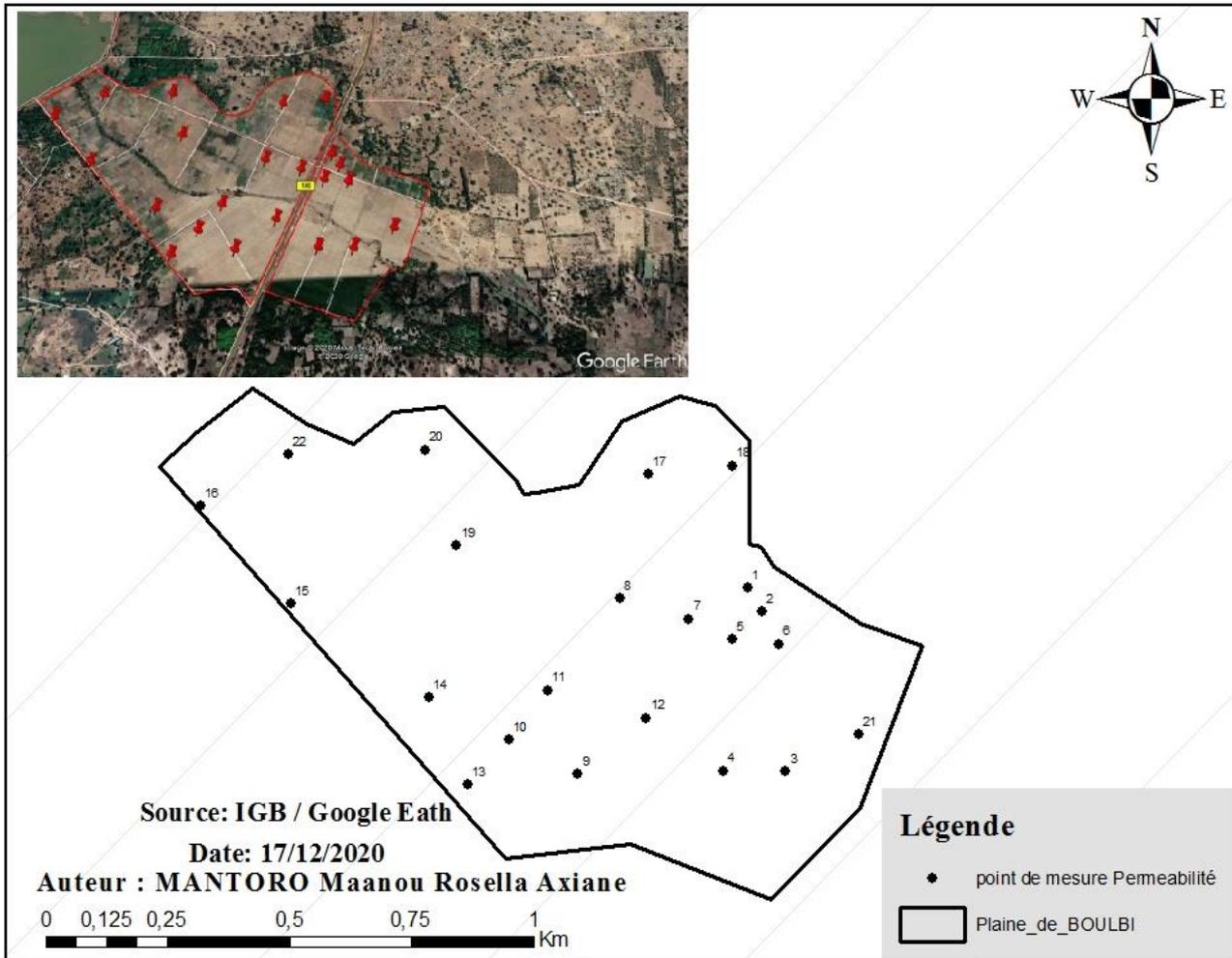


Figure 5. Carte des points de mesure d'infiltration par le double anneau

Durant cette campagne de mesure, nous avons effectué au total 22 points de mesure avec l'infiltromètre de Muntz sur la plaine de Boulbi. Les 22 points de mesure (*Figure 5*) ont été choisis de manière à couvrir toute l'étendue du périmètre, et en zonant les différents types de sols sur le périmètre à l'œil nu pour le positionnement de l'infiltromètre.

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel Minitab 18 par application de la méthode aux moindres carrés de l'infiltration cumulée pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation (Ksat). Les perméabilités (Ksat) sont ensuite introduites dans le logiciel Soil Water Characteristics pour la détermination des humidités caractéristiques du sol. La réserve utile (RU) du sol est obtenue avec la valeur moyenne des conductivités hydrauliques à saturation du type de sol dominant.

III.3.2 Evaluation de la ressource en eau souterraine

Plusieurs méthodes d'évaluation de la recharge d'une nappe ont été proposées et approuvées dans diverses conditions. Ces techniques, dont certaines ont fait l'objet de revues comparatives ont été classées en plusieurs catégories selon les processus qu'elles impliquent (BESBES, 2006). Toutes les méthodes utilisées se basent sur différentes considérations et chacune des considérations s'accompagne d'incertitude (DARA, 2017). Ne disposant pas de données à l'échelle de la plaine qui permettent de quantifier la recharge ; la méthode du « bilan de Thornthwaite » est utilisée pour son estimation en utilisant les données pluviométriques de la station de Komsilga, et les données climatologiques de la station de Ouagadougou-Aéroport.

❖ Le bilan de THORNTHWAITE

Le calcul de la recharge avec la méthode du bilan de Thornthwaite est basé sur le schéma physique, (*Figure 6*) selon lequel la pluie tombée sur le bassin versant prend quatre destinations (DAKOURE, 2003) :

- L'évapotranspiration réelle (ETR) ;
- Le ruissellement (R) ;
- La recharge des nappes ou infiltration efficace (I) ;
- La variation de stock d'eau dans le sol (Δs).

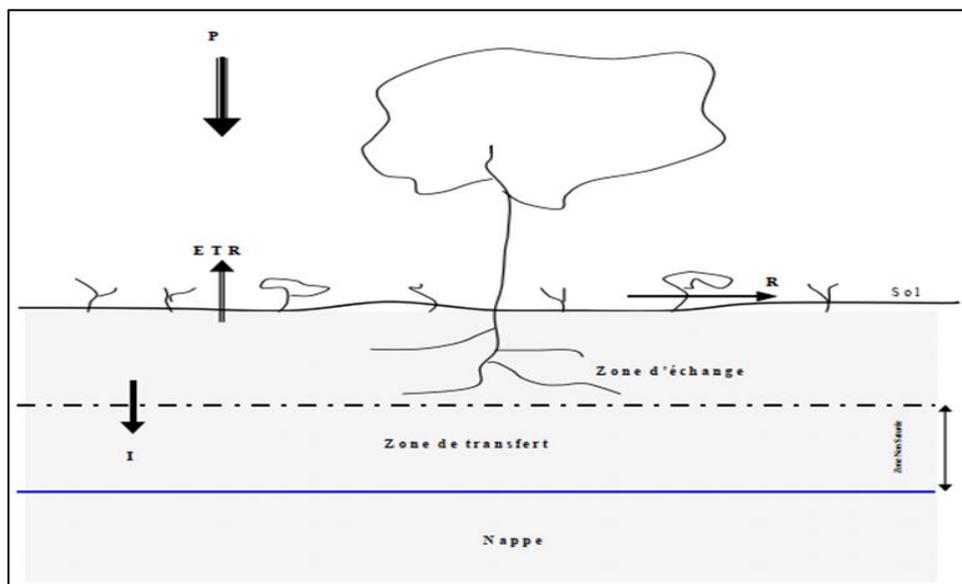


Figure 6. Schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite (DAKOURE, 2003)

La hauteur moyenne de pluie tombée est calculée par l'équation **ci-dessous** :

$$P(mm) = I(mm) + ETR(mm) + R(mm) \pm \Delta S(mm) \quad (1)$$

Avec : **P** : Hauteur moyenne de la pluie tombée

I : Infiltration qui alimente-Recharge la nappe

ETR : Evapotranspiration Réelle

R : Lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant

ΔS : Variation du stock d'eau dans le sol

Les hydrogéologues s'intéressent à la détermination de l'infiltration car elle détermine la part qui alimente la nappe d'eau souterraine. À la vue de la complexité du processus d'échange entre l'écoulement souterrain et celui de surface, on substitue le terme $R + I$ en pluie efficace.

L'éq (1) est réécrite de la manière ci-dessous :

$$I(mm) = P(mm) - ETR(mm) - R(mm) \pm \Delta S(mm) \quad (2)$$

Avec : **P** : Hauteur moyenne de la pluie tombée

I : Infiltration qui alimente-Recharge la nappe

ETR : Evapotranspiration Réelle

R : Lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant

ΔS : Variation du stock d'eau dans le sol (négligeable)

On calcule l'évapotranspiration réelle (ETR) en comparant l'évapotranspiration potentielle et les réserves en eau disponibles (RU) pour l'évaporation et la transpiration. Cette disponibilité en eau est estimée à l'aide de la réserve facilement utilisable (RFU) qui est une réserve conceptuelle car n'ayant pas de réalité physique, même si l'on peut l'assimiler à la quantité d'eau stockée dans les premiers mètres du sol. Le principe de calcul doit permettre à la pluie d'alimenter en priorité l'ETP, puis de compléter la RFU jusqu'à son maximum, et enfin d'alimenter le ruissellement et l'infiltration (DAKOURE, 2003).

La méthode du bilan de Thornthwaite est limitée par la difficulté à quantifier les variables du bilan. En plus de cela, la méthode surestime la recharge et n'autorise pas son estimation précise car elle ne montre aucun rapport sur la durée de réponse entre le début de l'apparition de la pluie efficace et les variations du niveau de l'eau dans la nappe.

L'algorithme de calcul des termes du bilan de Thornthwaite est présenté à (ANNEXE E).

III.3.3 Méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution

Plusieurs méthodes permettent d'évaluer la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Parmi ces méthodes, nous avons : les méthodes hydrogéologiques de type matriciel, les méthodes des systèmes de ration et les méthodes de ration et de paramètres pondérés (KIMMEIER & AL, 2001). Pour notre étude les méthodes DRASTIC, GOD et SI ont été utilisées.

Le terme vulnérabilité date des années 1960 et a été choisi pour sensibiliser la population au fait que même si la notion d'eau souterraine est associée à une image de pureté, cette ressource n'en reste pas moins sensible aux agents extérieurs et susceptible d'être polluée, (MURAT & AL, 2000). Selon les caractéristiques du milieu naturel le concept de vulnérabilité pourra prendre des formes et des degrés variés, de manière à mettre en évidence les capacités de résistances naturelles d'une nappe vis-à-vis d'une pollution. Les différentes études de vulnérabilité font la distinction entre deux notions d'évaluation de la vulnérabilité :

- ***La vulnérabilité intrinsèque*** : qui fait intervenir les conditions physiques naturelles du milieu. C'est une propriété intrinsèque des systèmes aquifères qui dépend de la sensibilité qu'ont ces systèmes, vis-à-vis des impacts humains et naturels (VRBA & ZAPOZOZEC, 1994).
- ***La vulnérabilité spécifique*** : qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels, mais aussi les propriétés du contaminant, aux activités humaines ou mêmes aux populations à risque.

a) *Caractérisation des intrants agricoles*

L'inventaire des intrants agricoles a été fait sous forme d'enquête administrée aux exploitants du périmètre. L'enquête (ANNEXE I) s'est déroulée pendant le mois d'Aout 2020 durant 15

jours, Les données ont été collectées par la méthode d'enquête individuelle. Ces données collectées ont permis de faire ressortir le type et la quantité de produits phytosanitaires, de même que pour les engrais utilisés.

b) Évaluation des paramètres de vulnérabilité

Plusieurs paramètres interviennent dans le transfert de polluants à partir de la surface du sol, nous avons :

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

C'est la distance verticale de la surface topographique à la surface piézométrique. Il détermine l'épaisseur de matériaux que doit traverser un contaminant avant d'arriver à la nappe ; il permet de déterminer le temps de contact avec le milieu et donc l'influence du milieu et l'efficacité des processus chimiques, de dégradation et d'atténuation d'un contaminant (MURAT & AL, 2000).

Le cas le plus défavorable a été retenu à savoir le niveau statique en période de hautes eaux. Pour déterminer ce paramètre, nous avons utilisés les données piézométriques mené au niveau des puits dont dispose le site.

- ***La recharge nette de la nappe***

Il s'agit d'une notion complexe qui fait intervenir un grand nombre de processus et de propriétés du milieu, son estimation se fait sur une année. Ce paramètre est déterminé en fonction du taux de précipitation qui s'infiltré et percole vers la surface libre. Plus la recharge est importante plus la possibilité de pollution de la nappe est importante (MURAT & AL, 2000).

- ***La nature lithologique de l'aquifère***

Un aquifère est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement et le captage d'eau souterraine. Les matériaux de l'aquifère déterminent la mobilité d'un éventuel contaminant dans cet aquifère (MURAT & AL, 2000). Pour déterminer ce paramètre, les coupes lithologiques de forage réalisés à proximité de la zone d'étude ont été utilisées, et les couches dominantes ont été retenues.

- ***La texture du sol***

La texture d'un sol représente la répartition granulométrique de ses constituants. Le type de sol détermine la quantité d'eau infiltrée qui peut atteindre la surface piézométrique. La capacité à laisser passer ou à retenir le polluant change en fonction de la nature du sol. Ce paramètre correspond généralement au premier dépôt à partir de la surface topographique. La

détermination du type de sol a été obtenue à l'aide de la perméabilité K_{sat} (mm/h) sur le logiciel SPAW.

▪ *La topographie ou la pente du terrain*

Le terme topographie fait référence à la pente de la surface du sol. Elle indique si un polluant fuira ou restera à la surface du sol pour s'infiltrer dans la nappe. La pente est directement liée au fait qu'un polluant puisse être diffusé par les eaux de ruissellement en surface. La topographie est obtenue grâce au MNT (modèle numérique de terrain) de la zone d'étude grâce à l'outil spatial analyst de ArcGIS.

▪ *Impact de la zone non saturée ou zone vadose*

La zone non saturée ou zone vadose représente la zone qui se situe au-dessus de la surface du niveau de l'eau de la nappe. La géologie de la zone non saturée détermine la vitesse de transfert du polluant dans l'aquifère.

▪ *La conductivité hydraulique ou perméabilité de la zone saturée*

La conductivité est la capacité des matériaux d'un aquifère à transmettre de l'eau, elle est contrôlée par l'interconnexion des pores, le type de sol, la porosité, le gradient hydraulique. Plus elle est grande, plus le transfert de polluant est rapide. Ce paramètre a été obtenu par des essais in-situ avec le double anneau.

▪ *L'occupation du sol*

La carte de l'occupation du sol est un paramètre déterminant dans l'utilisation et la gestion du territoire ; elle traduit les activités anthropiques et l'occupation naturelle des terres (SIMBORO, 2015). Elle informe sur le potentiel d'émission d'un polluant à la surface du sol.

Les informations sur la carte d'occupation du sol de la plaine de Boulbi proviennent du plan communal de développement de la commune de Komsilga datant de 2013.

c) Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

La méthode **DRASTIC** a été mise au point aux Etats-Unis en 1987 par Environmental Protection Agency, (ALLER & AL, 1987). C'est une méthode standard d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité verticale des eaux souterraines à la pollution indépendamment du type de polluant.

La méthode DRASTIC combine sept paramètres considérés comme facteurs de vulnérabilité :

- **D** : (Depth to groundwater) Profondeur du plan d'eau de la nappe souterraine ;
- **R** : Recharge nette de la nappe ;
- **A** : (Aquifer media) Nature lithologique de l'aquifère ;
- **S** : (Soil media) Texture du sol ;
- **T** : (Topography) Topographie ou pente du terrain ;
- **I** : (Impact of vadose zone) Impact de la zone non saturée ;
- **C** : (Conductivity) Conductivité hydraulique ou Perméabilité de la zone saturée.

Chacun de ses paramètres est subdivisé en classe, attribué de cotes allant de 1 à 10 en fonction des conditions locales. L'importance de chaque paramètre est évaluée par un poids fixe compris entre 1 et 5. La valeur 1 correspond aux conditions de très faible vulnérabilité à la pollution et la valeur 10 à celles de forte vulnérabilité.

Tableau II. Poids des paramètres DRASTIC (ALLER & AL, 1987)

Symboles	Significations	Facteurs de pondération générale (poids)	Facteurs de pondération pour pesticides (poids)
D	Profondeur du plan d'eau de la nappe souterraine	5	5
R	Recharge nette de la nappe	4	4
A	Nature lithologique de l'aquifère	3	3
S	Texture du sol	2	5
T	Topographie ou pente du terrain	1	3
I	Impact des formations de la zone non saturée	5	4
C	Conductivité hydraulique ou perméabilité de la zone saturée	3	2

Le degré de vulnérabilité est évalué par l'indice DRASTIC qui est la somme pondérée de 7 cotes correspondant aux 7 paramètres décrit dans le tableau ci-dessus. L'indice total **éq (3)** est obtenu par multiplication par son poids relatif :

$$ID = (DwDr) + (RwRr) + (AwAr) + (SwSr) + (TwTr) + (IwIr) + (CwCr) \quad (3)$$

$$\text{Indice DRASTIC (\%)} = \frac{ID-23}{203} * 100$$

Avec: ID: Indice DRASTIC

R: Rating (cote)

W: *Weight (poids)*

Après le calcul de l'indice, en fonction des classes de valeur de l'indice DRASTIC obtenu, des degrés de vulnérabilité (*Tableau III*) ont été définis par (ALLER & AL, 1987) :

Tableau III. Classification des indices de vulnérabilité DRASTIC (ALLER & AL, 1987)

DEGRE DE VULNERABILITE	INDICE DRASTIC
Très faible	23 – 80 (0 - 30%)
Faible	80 – 100 (31 - 45%)
Moyenne	100 – 140 (46 - 60%)
Forte	140 – 180 (61 - 75%)
Très élevée	180 – 226 (76 - 100%)

Une nouvelle approche développée en 1995 par le ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ, 1995), consiste à diviser en trois catégories, l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique (*Tableau IV*).

Tableau IV. Classification des indices DRASTIC sur l'échelle de vulnérabilité hydrogéologique (JOUDA & et AL, 2007)

Catégories	Indice de vulnérabilité (%)	Conclusion
1	0 à 35	Assurément bien protégé
2	Compris entre 35 et 75	Protection hydrogéologique incertaine
3	75 à 100	Assurément vulnérable

La limite de la méthode DRASTIC est qu'elle ne tient pas compte de certains paramètres qui ont une forte influence sur la pollution tels que les failles ou l'intensité de la pluviométrie (GOUGO, 2016).

La méthode d'évaluation ainsi que les cotes affectées aux classes de chaque paramètre de la méthode DRASTIC sont présentées à (**ANNEXE G**).

d) Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode GOD

Comme la méthode DRASTIC, la méthode GOD est une méthode des systèmes paramétriques mais elle utilise moins de paramètres. C'est une méthode conçue en Angleterre en 1987 par Foster. Le nom de la méthode provient d'un acronyme anglais : **G**roundwater occurrence **O**verval aquifer class and **D**epth water table. C'est une méthode qui permet d'estimer rapidement la vulnérabilité d'un aquifère (KOUAME, 2007), à partir de trois paramètres qui sont les suivants :

- **G** : (**G**roundwater occurrence) Type de nappe en fonction de son degré de confinement qui sert à déterminer si l'aquifère est libre ou captif ;
- **O** : (**O**verval aquifer class) lithologie de de la zone non saturé
- **D** : (**D**epth to groundwater) Profondeur de la nappe ;

L'indice de vulnérabilité GOD est obtenu par la multiplication des côtes (*Tableau V*) de chacun des trois paramètres (MURAT et Al, 2000) selon l'éq.(4) :

$$IGOD = G_n * O_n * D_n \tag{4}$$

Tableau V. Cotes des paramètres de vulnérabilité par GOD (ALLER & AL, 1987)

PARAMETRES	CLASSE	COTES
G (type d'aquifère)	Artésien	0,1
	Confiné	0,2
	Semi confiné	0,3
	Libre avec couverture	0,4 - 0,6
	Libre	0,7 - 1,0
O (lithologie de la zone non saturée)	Sol résiduel	0,4
	Limon alluvial, lèss, calcaire fin	0,5
	Sol éolien, silice, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0,6
	Sable et Gravier, grés	0,7
	Gravier (colluvion)	0,8
	Calcaire	0,9
	Calcaire fracturé ou karstique	1
D (profondeur de la nappe en mètre)	0 - 1,5	1
	1,5 - 4,5	0,9
	4,5 - 9	0,8
	9,0 - 15,0	0,7
	15 - 23	0,6
	23 - 30	0,4
	> 30	0,4

Après le calcul de l'indice GOD, le degré de vulnérabilité se définit suivant le (*Tableau VI*) ci-dessous :

Tableau VI. Classification des indices de vulnérabilité GOD (ALLER & AL, 1987)

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

e) Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode SI

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

D : (Depth to groundwater) Profondeur de la nappe

R : Recharge nette

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

T : (Topography) Topographie des terrains

OS : (Land use) Occupation du sol.

L'indice de vulnérabilité SI est obtenu par le calcul de l'indice de vulnérabilité (ISI) par la formule : **éq(5)** ci-dessous:

$$ISI = DcxDp + RcxRp + AcxAp + TcxTp + OcxOp \quad (5)$$

Dans la méthode SI, les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà pris en compte dans la méthode DRASTIC en multipliant les cotes par 10. Le nouveau paramètre qui est *Occupation des sols* a une cote allant de 0 à 100, du moins vulnérable au plus vulnérable.

Tableau VII. Cotes et poids des paramètres de vulnérabilité SI (KHEMIRI & AL, 2013)

PARAMETRES	POIDS	CLASSE	COTES
D (profondeur de la nappe en mètres)	0,186	0 - 1,5	100
		1,5 - 4,5	90
		4,5 - 9	70
		9,0 - 15,0	50
		15 - 23	30
		23 - 30	20
		> 30	10
R (recharge en mm/an)	0,212	0 - 50	10
		50 - 100	30
		100 - 175	60
		175 - 225	80
		> 225	90
A (lithologie de l'aquifère)	0,259	Roches ignées ou métamorphiques	30
		Roches ignées ou métamorphiques altérées	40
		Calcaire massif	80
		Grés massif	60
		Sable et Gravier	80
		Basalte	90
		Calcaire karstique	100
Topographie des terrains (pente en degré)	0,121	0 - 2	100
		2,0 - 6,0	90
		6,0 - 12	50
		12,0 - 18,0	30
		> 18	10
OS (occupation des sols)	0,222	Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
		Périmètre irrigué, rizière, culture annuelle irriguée ou non irriguée	90
		Carrière, chantier naval	80
		Zones artificielles couvertes, zone verte, zone urbaine continue	75
		Culture permanente (vigne, olivier...)	70
		Zone urbaine discontinue	70
		Pâturages et zone agro-forestière	50
		Milieus aquatiques	50
Foret et zone semi naturelle	0		

Après le calcul de l'indice de susceptibilité, le degré de vulnérabilité se définit suivant le (Tableau VIII) ci-dessous :

Tableau VIII. Classification des indices de vulnérabilité SI (KHEMIRI & AL, 2013)

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

f) Étude comparative des méthodes de cartographie de la vulnérabilité

L'analyse de surface permet de connaître la différence qui existe entre les cartes de vulnérabilité élaborées par les différentes méthodes. Dans l'analyse statistique de surfaces deux aspects sont à considérer :

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

En effet, deux cartes de vulnérabilité peuvent être concordantes sans présenter les mêmes indices. La concordance des cartes se traduit par des variations d'indices semblables d'une carte à l'autre sur l'ensemble du territoire (MURAT & AL, 2000). Pour cette étude, des indices ont été assignés à chaque classe de vulnérabilité (**Tableau IX**) comme suit :

Tableau IX. Indices affectés aux différentes classes de vulnérabilité

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

III.3.4 Détermination des paramètres physico-chimique des eaux

Afin de réaliser l'état des lieux de la pollution dans la zone d'étude, il a été effectué des prélèvements d'eau à divers points sur la plaine : dans les puits, dans les drains, dans les parcelles et au barrage. Le but recherché est d'une part la recherche des valeurs des paramètres physiques comme le Ph et la conductivité électrique, mais aussi de caractériser la qualité des eaux par les analyses chimiques en déterminant les concentrations des ions Nitrates, Phosphates, Sulfates et Potassium.

a) Méthode d'échantillonnage des échantillons d'eau

Les prélèvements ponctuels d'eau ont été réalisés à différents points sur la plaine de manière à avoir une représentation générale, ainsi qu'au niveau du barrage et dans les puits. Pour chaque point d'échantillonnage, 1 échantillon de 0.5 litre d'eau a été prélevé. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide de bouteilles en plastique de 0.5 litre, rincées au préalable trois fois avec l'eau à prélever. Les flacons sont bien fermés, excluant la pénétration d'air dans le but d'empêcher l'évolution des paramètres pendant l'échantillonnage pour que les résultats analytiques soient en conformité avec le milieu lors de l'échantillonnage. Les échantillons sont amenés à la base de résidence sur le terrain, puis transportés au laboratoire à l'intérieur d'une glacière (à 4°C). Ils ont été stockés dès que possible dans un congélateur, au laboratoire, en attendant la phase d'analyse.



Photo 2. Echantillonnage des eaux pour les analyses

b) Analyse chimique des échantillons d'eau

- ❖ **Le potentiel hydrogène** : Le pH d'une eau est une indication de son acidité, son alcalinité ou sa neutralité. Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Au-dessus de 7, l'eau est considérée comme basique (la quantité d'ions OH⁻ est supérieure à celle d'ions H⁺), et en dessous de 7, elle est acide (les ions H⁺ sont en quantité supérieure).
- ❖ **La conductivité électrique** : La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau, et varie proportionnellement avec les fluctuations de la température. Sa variation renseigne sur les zones de mélange ou d'infiltration, permet de suivre l'évolution d'une pollution chimique. Elle s'exprime en microsiemens par centimètre, où 2 µs/cm correspondent à 1 mg de sels dissous par litre d'eau (RODIER & AL, 1996).
- ❖ **Le nitrate** : Les nitrates sont naturellement présents dans l'eau car ils constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique. Cependant leurs teneurs peuvent être fortement élevées du fait des activités agricoles, de l'élevage ou des rejets d'eaux usées industrielles et domestiques (KONE & AL, 2009)
- ❖ **Le sulfate** : Les sulfates peuvent être trouvés dans presque toutes les eaux naturelles, sont naturellement présents dans divers minéraux et proviennent essentiellement de l'érosion, facteur qui constitue le principal agent d'enrichissement des eaux de surface par dissolution du gypse ou bien par oxydation des surfaces des substrats ou de la matière organique des sols. Les concentrations les plus élevées dans les eaux souterraines sont généralement d'origine naturelle ; mais peuvent aussi être dues aux apports d'origine agricole (MOUSSA NOMANO, 2017).
- ❖ **L'ortho-phosphate** : Le phosphore peut exister dans les eaux à l'état dissout ou en suspension. Le phosphore total dissout comprend le phosphore organique et le phosphore inorganique qui comprend les ortho-phosphates et les polyphosphates. Le phosphore est l'un des nutriments indispensables de la plante et représente un élément biogène indispensable à la croissance des algues. Les teneurs élevées de cet élément dans les eaux de surface peuvent entraîner leur eutrophisation. Cependant, ils ont un effet bénéfique en jouant un rôle régulateur. (PIERRE & MAYER, 2017).

- ❖ **Le potassium** : Le potassium est indispensable à la vie, il participe directement à la formation et à la croissance des cellules. C'est un élément nutritif prélevé en très grande quantité par la plante. Il existe une grande interaction entre l'azote et le potassium en effet lorsque l'apport en azote est grand, la demande en potassium sera aussi élevée. Une carence en ions potassium peut affaiblir la capacité de la plante à entretenir ces mécanismes physiologiques.

Les paramètres physiques sensibles comme *le potentiel hydrogène (pH)* et *la conductivité électrique (CE)* qui peuvent facilement changer lors de l'acheminement, ont été mesurés in-situ sur les échantillons non filtrés à l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre. Pour les paramètres chimiques, avec la pompe à vide, les échantillons ont été filtrés à l'aide des filtres GFC au sein du laboratoire Eaux Hydro-systèmes et Agricultures (LEHSA) de 2iE. Les ions sulfates (SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-), phosphore (PO_4^{2-}) sont déterminés par spectrométrie d'absorption moléculaire (direct Reading DR 3900) et le potassium K^+ est déterminé par la spectrométrie à flammes. Le (*Tableau X*) résume les caractéristiques des méthodes et équipements utilisés pour les paramètres analysés. En (*ANNEXE B*), nous avons les protocoles d'analyse pour chacun des ions. Au total, pour la période d'étude, 32 échantillons d'eau ont été analysés.

Tableau X. Liste des paramètres analysés et des méthodes appliquées

PARAMETRES	MATERIELS	METHODES
Potentiel Hydrogène PH	PH-mètre 3310 SET 2	Méthode standard (1995)
Conductivité ($\mu S/cm$)	Conductimètre 3110 SET 1	Méthode standard (1995)
Sulfate SO_4^{2-} (mg/L)	Spectrophotomètre a absorption moléculaire DR3900	Méthode HACH Sulavert 3
Nitrate NO_3^- (mg/L)	Spectrophotomètre a absorption moléculaire DR3900	Méthode HACH Nitriver5
PO_4^{3-} (mg/L)	Spectrophotomètre a absorption moléculaire DR3900	Méthode HACH Phosver 3
Potassium K^+ (mg/L)	Spectromètre à flammes	Méthode d'absorption atomique avec flamme

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Caractérisation des paramètres hydrodynamiques du sol

Après le traitement des données des mesures d'infiltration effectuées sur la plaine rizicole de Boulbi, les résultats obtenus sont reportés au (*Tableau XI*) :

Tableau XI. Résultat des mesures d'infiltration

Nomenclature	KSAT (mm/h)	Type des sols
1	14.72	Limoneux
2	2.14	Argilo-limoneux
3	80.39	Limoneux-sableux
4	27.68	Limoneux-sableux
5	9.11	Limoneux
6	14.22	Limoneux
7	1.86	Argilo-limoneux
8	14.32	Limoneux
9	2.74	Argilo-limoneux
10	4.53	Argilo-limoneux
11	16.92	Limoneux
12	3.79	Argilo-limoneux
13	3.83	Argilo-limoneux
14	64.46	Limoneux-sableux
15	50.49	Limoneux-sableux
16	3.26	Argilo-limoneux
17	15.44	Limoneux
18	14.99	Limoneux
19	21.49	Limoneux-sableux
20	6.68	Limoneux
21	1.98	Argilo-limoneux
22	3.35	Argilo-limoneux

L'analyse du tableau nous révèle que sur la plaine de Boulbi on rencontre (03) différents types de sol à savoir : les sols *Limoneux*, *Limoneux-Sableux* et *Argilo-Limoneux*. Le type de sol dominant est « *Argilo-limoneux* » avec une conductivité hydraulique à saturation moyenne de **3.05 mm/h**. Le sol argilo-limoneux est un sol lourd et adapté à la culture du riz, mais la vitesse

d'infiltration est lente et le travail est souvent difficile. L'exploitation des types de sols fournis par le logiciel Soil Water Characteristics, nous a permis de dresser la carte pédologique de la plaine rizicole de Boulbi.

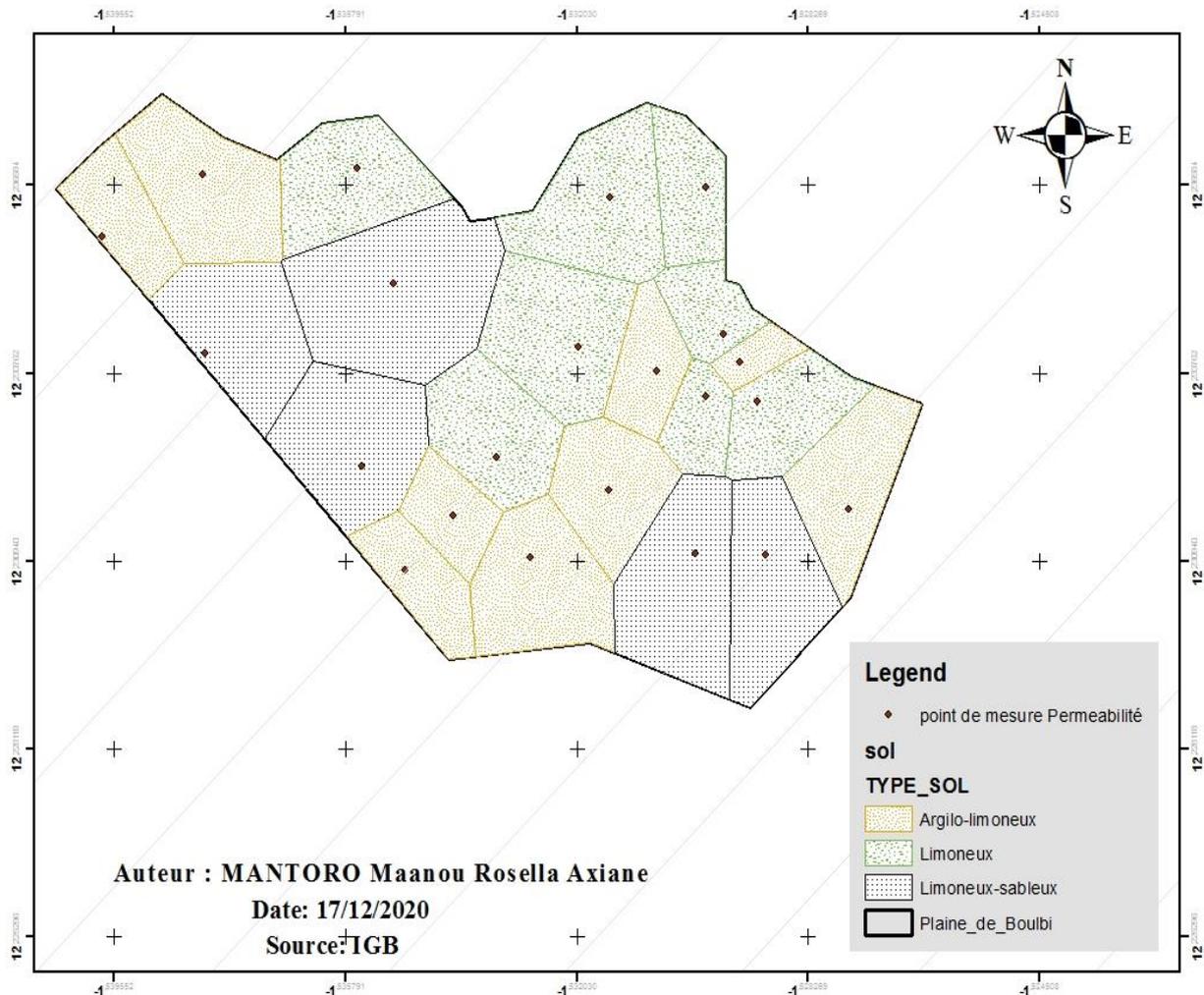


Figure 7. Carte pédologique de la plaine de Boulbi

IV.2 Evaluation de la ressource en eau souterraine

Les résultats de l'estimation de la recharge de l'aquifère par la méthode du bilan de Thornthwaite sont présentés au *Tableau XII*. Le pas de temps de calcul est mensuel et le coefficient de ruissellement sur le bassin versant est égal à 40 % (ORSTOM, 1961). La lame d'eau annuelle ruisselée (R) a été calculée en multipliant la hauteur annuelle d'eau précipitée par le coefficient de ruissellement. L'infiltration éq (2), qui est considérée comme la recharge de l'aquifère est obtenue en faisant la soustraction de la lame d'eau annuelle ruisselée (R) du terme « I+R ». La recharge annuelle est égale à **68.48 mm** soit **7 %** de la pluie. Elle est

supérieure aux valeurs trouvées pour les nappes des altérites dans la zone de Ouagadougou, comprise entre 19.95 et 49.88 mm/an par (HIE, 2009), qui s'explique peut être par la valeur élevée du coefficient de ruissellement, ou même la pluviométrie de l'année considérée.

Tableau XII. Paramètres du bilan de Thornthwaite pour l'estimation de la recharge annuelle

MOIS	PLUIE (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	I+R (mm)	R (mm)	Infiltration(mm)
Janv-19	0	62,536	0	0	0	68,4806
Févr-19	0	65,253	0	0	0	
Mars-19	0	117	0	0	0	
Avr-19	16	160,195	16	0	6,4	
Mai-19	107	153	107	0	42,8	
Juin-19	80	128	80	0	32	
Juil-19	170	94,038	94,038	75,962	68	
Août-19	374	63,762	63,762	310,237	149,6	
Sept-19	120	77,726	77,726	42,273	48	
Oct-19	115	82,193	82,193	32,806	46	
Nov-19	0	93,166	0	0	0	
Déc-19	0	62,156	0	0	0	
TOTAL	982			461.28	392.8	

IV.3 Méthodes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution

a) Résultat des enquêtes auprès des riziculteurs

A Boulbi l'agriculture est pratiquée essentiellement par des producteurs illettrés livrés à eux-mêmes. L'enquête a permis de faire un état des lieux sur les types de traitements appliqués dans la zone d'étude par les riziculteurs. Les plus fréquents concernaient le traitement à l'herbicide dû à la quantité des mauvaises herbes et les traitements aux insecticides du fait des ravageurs de culture. Cette situation coïncide avec celle décrite de façon générale au Burkina Faso (TOE A. , 2007). Les formulations de pesticide les plus souvent utilisées sont de types émulsionnants concentrés (EC), car plus pratique à utiliser. Les autres types de formulations (poudres mouillables, solutions aqueuses et des granulés) sont très peu utilisés. Les différents types d'intrant utilisés sur la plaine de Boulbi sont :

❖ **Les différents types d'engrais**

L'enquête sur le terrain, nous a permis d'inventorier trois types d'engrais utilisés sur la plaine de Boulbi, à savoir le NPK (composition d'Azote, Phosphore et Potassium), l'urée et la fumure organique. Le NPK et l'urée sont utilisés à 45% chacun et la fumure organique à 10%.

❖ **Les différents types de pesticides**

Les produits phytosanitaires utilisés sur le périmètre sont de vingt (20) types. Nous avons pu répertorier quinze (15) types d'herbicides et cinq (5) insecticides. Tous ces produits ne sont pas homologués et les classes de toxicités enregistrées sont les classes (II ; III et IV). Les classes de toxicités ainsi que les matières actives de chaque pesticide sont consignées en (ANNEXE H).

Pour les classes de toxicité mise en évidence par l'enquête terrain, L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) préconise que l'usage de ces produits soit réservé aux traiteurs entraînés et qui respectent les précautions prescrites (GOUGO, 2016). Après utilisation des produits, les boîtes sont jetées sur le périmètre et servent parfois de récipient pour enlever de l'eau, or les matières actives les plus dominantes dans ces produits sont : le Glyphosate et le Paraquat. Le Glyphosate est pourtant une substance très toxique et en Mai 2015, l'OMS l'a classé comme une substance cancérigène.



« **IMPACT DE LA RIZICULTURE PERI-URBAINE SUR LA POLLUTION DES EAUX :
CAS DE BOULBI DANS LA PROVINCE DU KADIOGO AU BURKINA FASO** »



Photo 3. Photos de quelques types de pesticides utilisés dans la zone d'étude



Figure 8. Emballage de pesticide abandonné sur la plaine

b) Analyses des paramètres

❖ La profondeur de la nappe

Les mesures piézométriques mensuelles réalisés au niveau des puits nous a permis d'obtenir le niveau de la nappe. En général la nappe est peu profonde, les niveaux statiques se situent en moyenne entre **2,22 et 3,55 m**. Donnant des valeurs de cotes élevées pour ce paramètre.

❖ La recharge efficace

La recharge efficace a été estimé par le calcul du bilan de Thornthwaite, il est déterminé en fonction du taux de précipitation qui s'infiltré et percole vers la surface libre. La recharge sur la plaine de Boulbi est faible et de l'ordre de **68.48 mm/an**. L'attribution des cotes s'effectue en tenant compte de cette recharge.

❖ Les Matériaux ou lithologie de l'aquifère (A)

La plaine rizicole de Boulbi a une nappe libre. L'aquifère superficiel est constitué d'alluvions essentiellement **argile et de granite** obtenue par analyse des logs de forages réalisés dans la zone. L'attribution des cotes s'effectue en tenant compte de la capacité de transmissivité de ces matériaux.

❖ Le type de Sol et la conductivité hydraulique

L'essai de perméabilité aux doubles anneaux a permis de déterminer la perméabilité des sols sur la plaine de Boulbi, qui nous a permis de pouvoir faire ressortir trois types de sols sur la plaine : **les sols argileux, argilo-limoneux et limoneux-sableux**. L'attribution des cotes s'effectue en tenant compte de la capacité de rétention de la des sols.

❖ La topographie

La plaine est caractérisée par une topographie plane. Les altitudes varient entre **290 m à 296 m**. Les pentes calculées donnent des valeurs très faibles qui sont comprises entre **0 et 4 %**. De ce fait, les valeurs des cotes attribuées pour ce paramètre sont fortes

❖ La zone non saturée

Au niveau de la nappe de la zone d'étude, la zone vadose est composé essentiellement d'argile, d'arène granitique et de granite obtenue par l'analyse des logs de forages réalisés dans la zone.

❖ L'occupation des sols

La plaine est une zone essentiellement agricole avec des rizières, des périmètres irrigués et des plantations. Seule la méthode SI est concernée par ce paramètre.

L'ensemble des côtes attribués aux paramètres ci-dessus en fonction des trois méthodes de vulnérabilité à la pollution agricole sont résumés dans le (*Tableau XIII*) suivant :

Tableau XIII. Cotes obtenues par chaque paramètre pour les trois méthodes de vulnérabilité

Cotes obtenues par méthodes				
Paramètres	Classe	DRASTIC	GOD	SI
Profondeur de la nappe D (m)	2,22 - 3,55	9	1	90
Recharge efficace R (mm/an)	68,48	3	-	30
Lithologie de l'aquifère	<i>Nappe libre / Granite fissuré et alimenté</i>	3	0,7	30
Type de sol	<i>Latérite</i>	3	-	-
	<i>Argileux</i>	1	-	-
	<i>Argilo- Limoneux</i>	4	-	-
	<i>Limoneux sableux</i>	6	-	-
Topographie des terrains (%)	0 - 2%	10	-	100
	2 - 4%	9	-	90
Impact de la zone vadose	<i>Argile</i>	3	0,55	-
	<i>Roche métamorphique ou ignée</i>	1	0,60	-
Conductivité hydraulique (m/s)	1,5.10 ⁻⁷ – 5.10 ⁻⁵	1	-	-
	5.10 ⁻⁵ – 15.10 ⁻⁵	2	-	-
Occupation des sols	<i>Périmètre irrigué, rizière, culture annuelle irriguée ou non irriguée</i>	-	-	90

c) Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

Sur la carte (**Figure 5**) de la vulnérabilité à la pollution agricole par la méthode DRASTIC, une classe de vulnérabilité a été mise en évidence :

- **La classe de vulnérabilité très faible** : occupant la totalité de la surface de la plaine, avec des indices oscillants entre 83 et 88. La valeur d'indice la plus faible est rencontré au niveau des sols argilo-limoneux, et la plus grande va vers les sols avec présence de sable. Elle présente également des indices drastic compris entre 29% et 32%, indiquant que la plaine est assurément bien protégée.

La nature du sol dominant présentant une teneur en argile très grande, constitue un facteur limitant l'infiltration des polluants vers la nappe d'où la classe de vulnérabilité relativement faible.

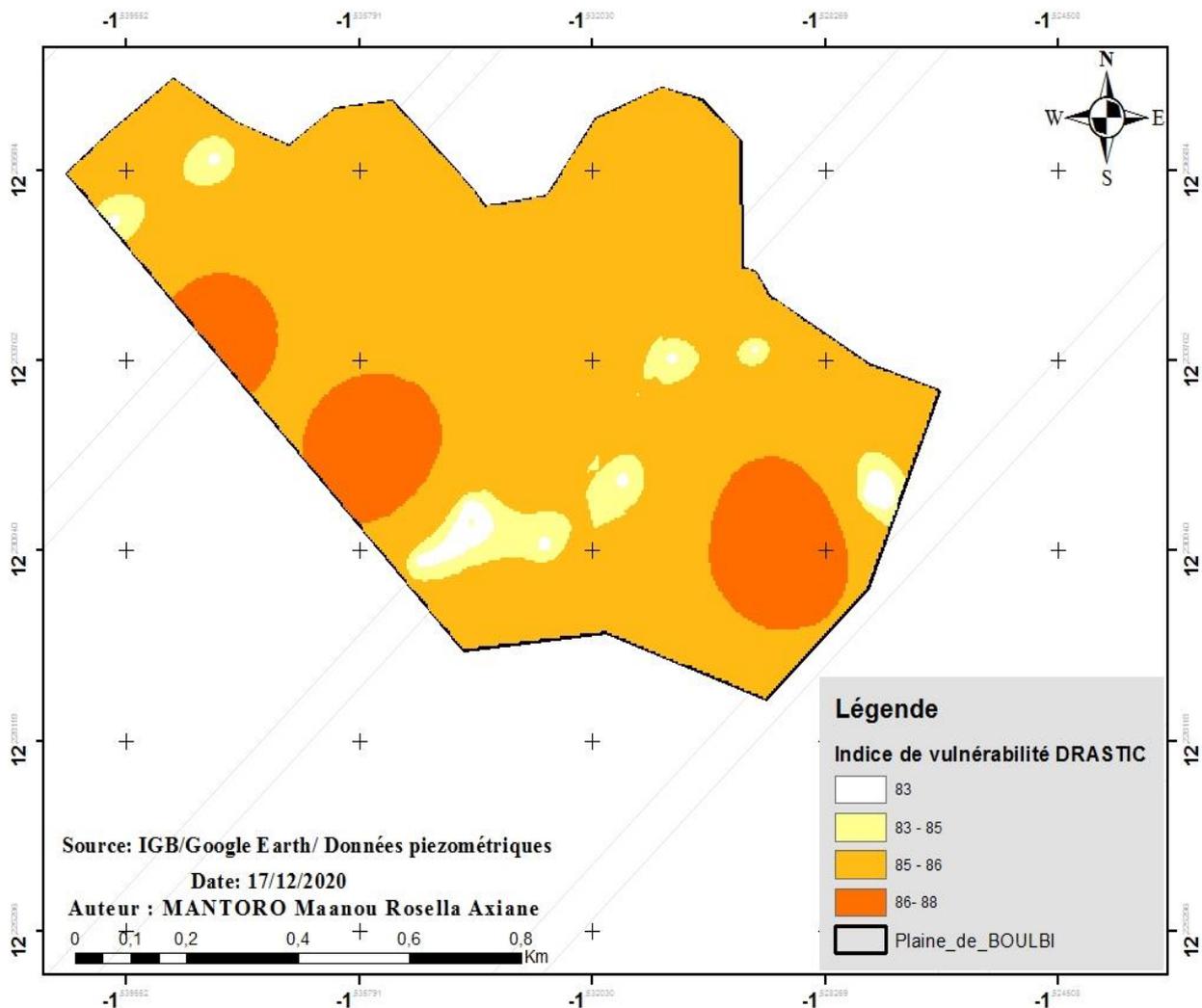


Figure 9. Carte de vulnérabilité à la pollution agricole par la méthode DRASTIC

d) Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode GOD

Une classification de indices a permis d'établir la carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD (*Figure 10*). L'analyse de cette carte révèle une classe (1) classe de vulnérabilité :

- **La Classe de vulnérabilité Modéré** : elle s'étend sur toute la zone d'étude avec des indices compris entre 0,35 et 0,42. Elle garantit une pollution moins sévère dans le cas d'une contamination. Ce degré de vulnérabilité moyen, peut être lié à la nature de la zone vadose essentiellement composé d'argile et de granite et du sol dominant sur la plaine constituée d'argile qui est peu perméable.

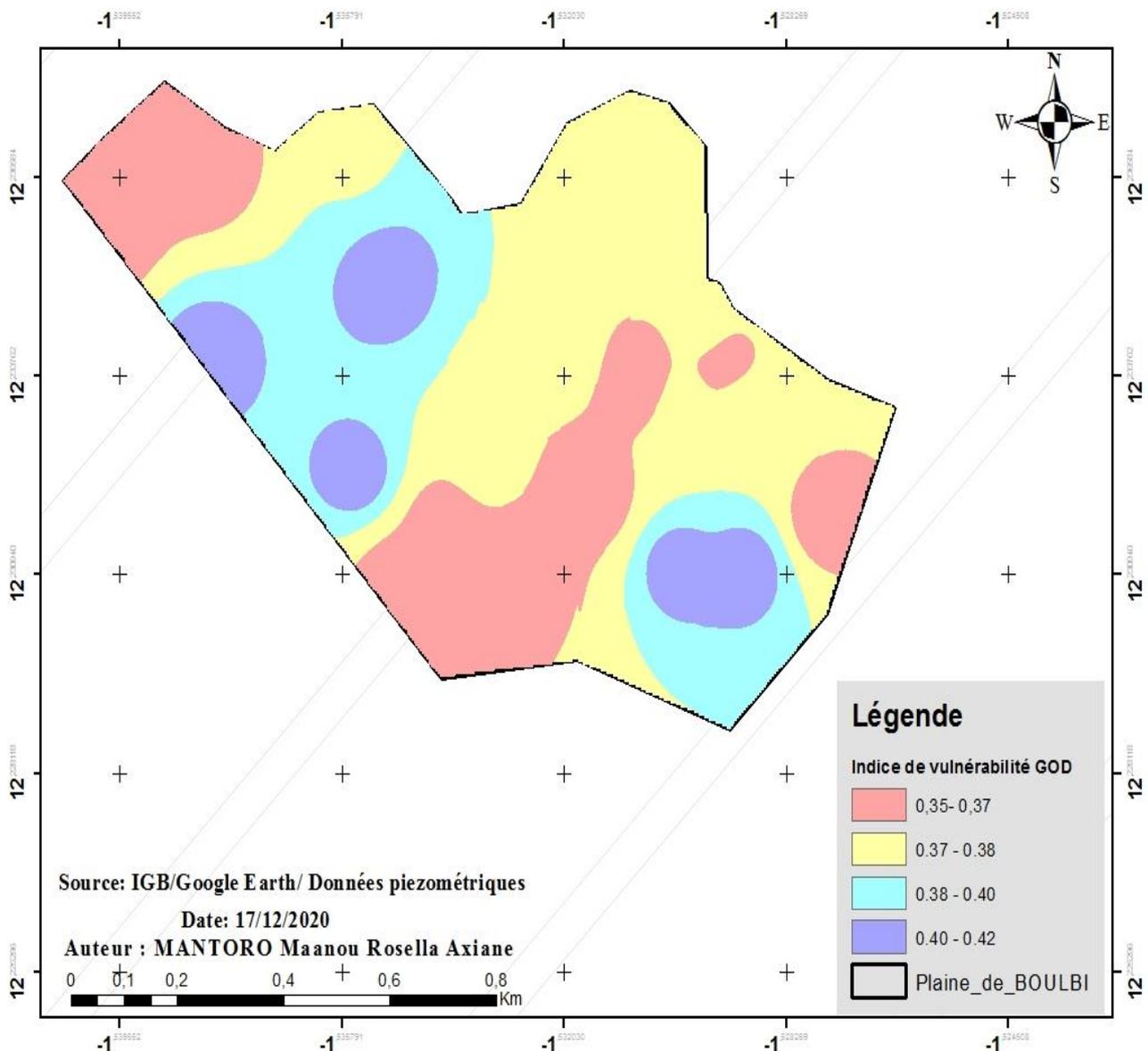


Figure 10. Carte de vulnérabilité à la pollution agricole par la méthode GOD

e) Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode SI

Pour la méthode SI, la carte des indices de vulnérabilité spécifique donne des valeurs qui varient entre 57.5 et 60. La classification de ces indices a permis d'établir la carte de vulnérabilité à la pollution par la méthode SI (*Figure 11*). L'analyse de cette carte met en évidence une classe de vulnérabilité :

- **La Classe Moyenne** : elle occupe la totalité de la plaine. Ces indices de vulnérabilité garantissent une pollution moins sévère dans le cas d'une contamination. Ce degré de vulnérabilité moyen, peut être lié à la nature du sol dominante constituée d'argile qui est peu perméable et aussi à la topographie très plane qui empêche l'infiltration des eaux.

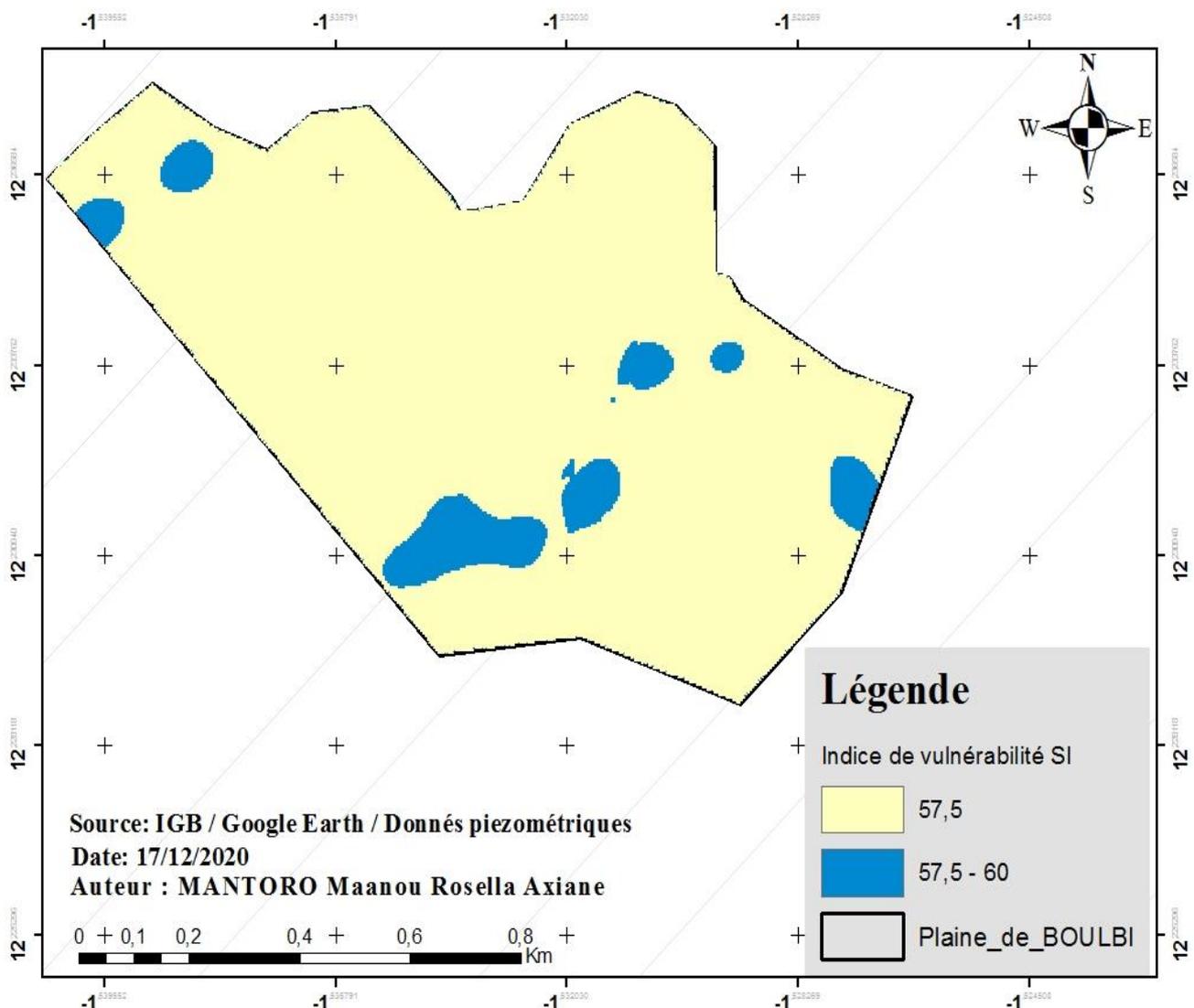


Figure 11. Carte de vulnérabilité à la pollution agricole par la méthode SI

f) Analyse comparative des résultats de vulnérabilité

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

Tableau XIV. Pourcentages des surfaces selon le degré de vulnérabilité

Classe de vulnérabilité	Pourcentage de surface par classe et par méthode (%)		
	DRASTIC	GOD	SI
Très faible (0)	5	0	0
Faible (1)	95	0	0
Moyenne (2)	0	100	100
Forte (3)	0	0	0
Très forte (4)	0	0	0

Il ressort que les méthodes SI et GOD présentent une vulnérabilité concentrée sur la classe « **moyenne** », représenté à 100% sur toute l'étendue de la plaine ; tandis que la méthode DRASTIC est plus concentrée sur la classe « **faible** » avec 95% de la surface de la plaine. De manière générale, les trois méthodes sont approximativement semblables, car en effet elles révèlent que la vulnérabilité de la pollution agricole est faible. On peut également noter que la méthode DRASTIC a tendance à minimiser la vulnérabilité.

IV.4 Détermination des caractéristiques physico-chimiques des eaux collectées

LES PRINCIPAUX PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE

Les paramètres mesurés sur le terrain concernent 32 prélèvements dont 21 pour les eaux de surface, 11 pour les eaux de puits présents sur la plaine. Les (*Tableau XVI et Tableau XVII*) présentent les moyennes et variations de ces paramètres par grande famille d'eau.

Tableau XIV. Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de puits (nappe cuirassée noyée)

Eau souterraine						
Paramètres	n	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-Type	CV %
Ph	11	7,7	6,9	7,32	0,2359	3,2223
Conductivité		271	150,1	195,6	42,1767	21,5627
NO3-		34,8	5,1	15,61	10,3658	66,4046
SO42-		3	0	1,18	1,0787	91,4169
PO43-		0,12	0,04	0,067	0,0237	35,3772
K+		1,66	6,11	4,44	1,4272	32,1452

Tableau XV. Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de surface

Eau de surface						
Paramètres	n	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-Type	CV %
Ph	21	8,7	7,1	8,15	0,4163	5,1077
Conductivité		183,7	136	156,85	12,3733	7,8886
NO3-		11	1,3	4,29	2,2532	52,5221
SO42-		2	0	0,57	0,7464	130,9509
PO43-		0,18	0,02	0,065	0,0437	67,1691
K+		8,88	1,66	5,05	1,9946	39,4976

➤ **Le Potentiel Hydrogène (pH)**

Les eaux de surface dans la plaine de Boulbi, au niveau des parcelles, des drains et du barrage sont basiques. La valeur moyenne du pH est de 8,2. Les eaux souterraines au niveau des puits présent sur la plaine sont légèrement basique, proche même de la neutralité avec un pH moyen de 7,3. Ces valeurs de pH sont en conformité avec les recommandations de l’OMS (**ANNEXE B**) sur les eaux de consommation (6,5-8,5). Elles sont cependant légèrement plus élevées que les valeurs trouvées par (OUANDAOGO, 2008) de 6,10 à 8.10 et 5.40 à 7.30 respectivement pour les eaux de surface et les eaux souterraines de Ouagadougou. En revanche d’autres auteurs comme (CHAPMAN & KIMSTACH, 1996) et (AGUIZA & AL, 2014) ont trouvé des valeurs de 6 à 8,5 dans les eaux de surface en Afrique subsaharienne.

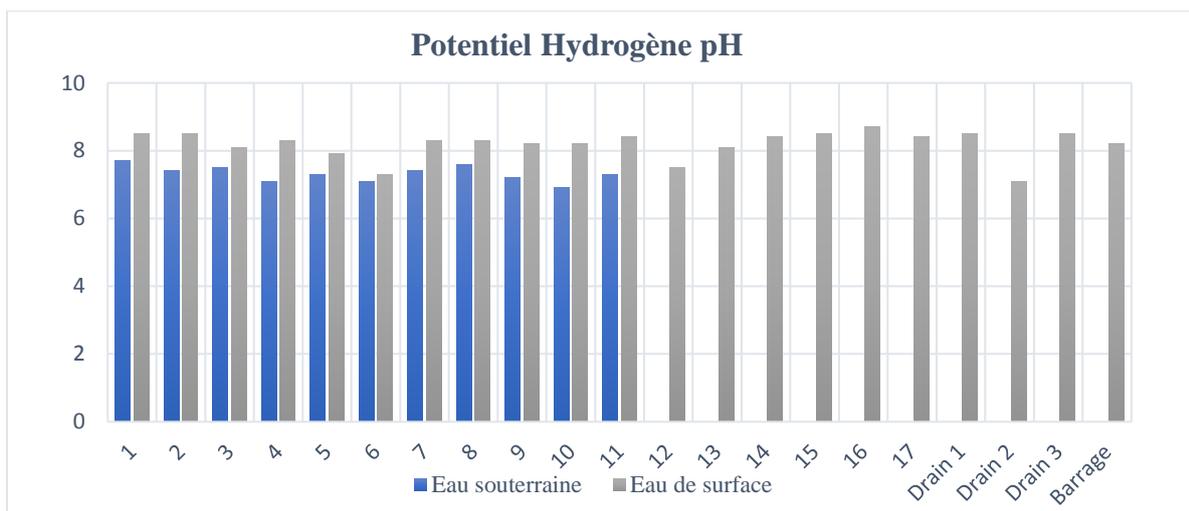


Figure 12. Evolution du pH au niveau des points de prélèvement

➤ **La conductivité électrique (CE)**

La conductivité moyenne est plus élevée pour les eaux souterraines (195.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$) contre (156.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$) pour les eaux de surface. Ces valeurs de conductivité sont en conformité avec les normes de l’OMS. Les eaux sont moyennement minéralisées car elles sont dans la gamme de valeur compris entre (150 et 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$). Les valeurs obtenues dans cette étude pour les eaux de surface sont inférieures à celle obtenue par (OUANDAOGO, 2008), avec des valeurs comprises de 170 à 350 $\mu\text{s}/\text{cm}$ mais variant considérablement en fonction de la saison. Il est connu que les valeurs de conductivité des eaux de surface changent en fonction de la structure géologique et de la

quantité de précipitations (TEPE & BOYD, 2003). Des valeurs de CE élevées indiquent la présence d'une concentration élevée de sels dissous dans l'eau et correspondent également à des pollutions locales ou ponctuelles des nappes souterraines en période pluvieuse (OUANDAOGO, 2008).

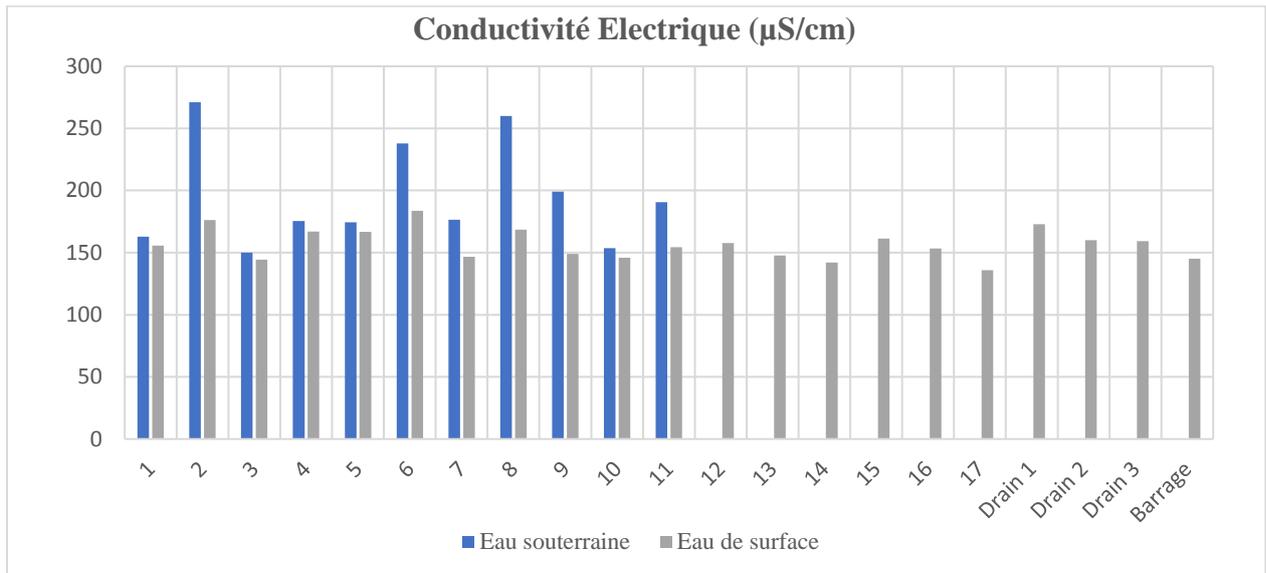


Figure 13. Evolution de la CE au niveau de chaque point de prélèvement

➤ **Le Nitrate (NO₃⁻)**

Les valeurs de nitrate varient significativement entre les eaux de surface et les eaux souterraines et sont comprises respectivement entre 5.1 et 34.8 mg/L pour les eaux souterraines et 1.3 et 11 mg/L pour les eaux de surface. Les valeurs obtenues montrent des concentrations en nitrate plus élevées dans les eaux de puits qui sont principalement dues aux pratiques d'irrigation, pisciculture, activités pastorales et le ruissellement autour et dans la plaine de Boulbi. Ces valeurs de Nitrate sont en conformité avec les recommandations de l'OMS sur les eaux de surface (50 mg/L). Des études mené par (SOME & et AL, 2008), et (TAPSOBA & AL, 2012) rapportent également des concentrations en dessous des normes limites admises par l'OMS pour les eaux de surface du bassin du Nakambé au Burkina Faso, et dans les barrages N°3 de Ouagadougou et DEBE respectivement de 34mg/L, 6,6 mg/l et 9,2 mg/l). Par contre

(OUANDAOGO, 2008) a trouvé des valeurs comprises entre 0 mg/l et 157,52mg/l dans les eaux de la nappe des altérites de Ouagadougou. La recherche des nitrates dans l'eau constitue un bon indicateur sur la qualité des eaux brutes, en considérant leur origine anthropique, ils permettent de suspecter la présence des contaminants comme les pesticides. A long terme la contamination aux nitrates peut entraîner généralement une eutrophisation des eaux superficielles due à l'apport excessif en nutriment et en matières biodégradables.

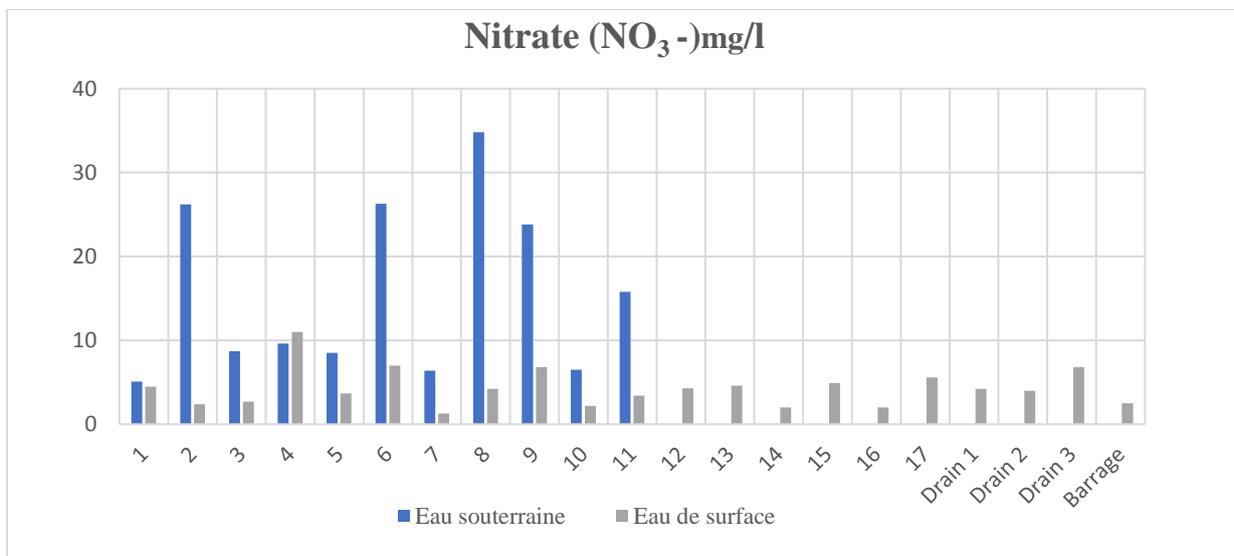


Figure 14. Evolution du nitrate au niveau de chaque point de prélèvement

➤ **Le Sulfate (SO₄²⁻)**

Les teneurs de sulfates dans nos échantillons d'eaux oscillent entre 0 mg/L et 3 mg/L, qui est bien en deçà et en conformité avec les recommandations de l'OMS (250 mg/L). Ces valeurs se rapprochent de celles obtenues par (MAHAMANE & et AL, 2015) dans la localité de Yamtenga au Burkina Faso, valeurs comprissent entre 0 et 9mg/L ; et aussi de celle obtenues par (SOME & et AL, 2008) au niveau des eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtédou (Burkina Faso). Une étude mené dans le sous bassin versant du barrage de Tougou par (DJIBO HAHIOU, 2020) a montré que les valeurs de sulfate sont plus élevées pendant les périodes de pluie que celles sans pluie pouvant être expliqué par la variation de la dose d'engrais au fur et à mesure de la croissance de la plante.

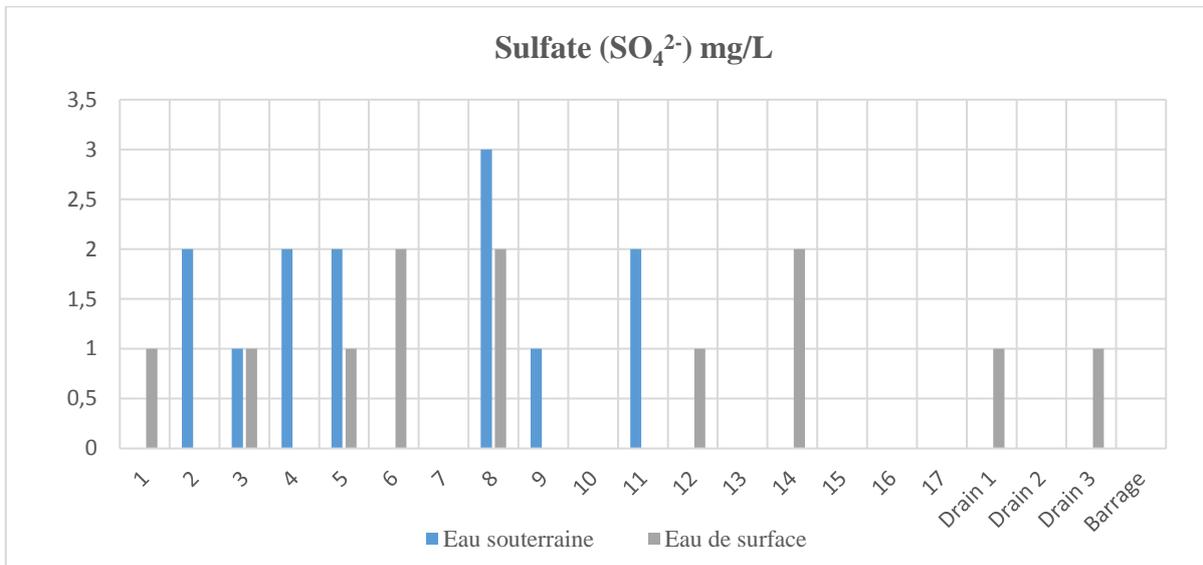


Figure 15. Evolution du sulfate au niveau de chaque point de prélèvement

➤ **Les O-Phosphates (PO₄³⁻)**

L'analyse des résultats montrent de très petites concentrations en phosphates de 0.04 à 0.12 mg/L et 0.02 à 0.18 mg/L respectivement pour les eaux souterraines et les eaux de surface. Ces valeurs de phosphore sont en conformité avec les recommandations de l'OMS, et se rapprochent de celles obtenues par (FIDELE & et AL, 2012) au niveau du barrage N°3 de Ouagadougou (0.14 mg/l). Une étude menée par (HAMMAMI & et AL, 2005) a montré que les ions NO₃⁻ et PO₄³⁻ retrouvés dans les eaux de surface, sont dues à l'utilisation d'engrais organique (fumure organique). Selon (ZACHARIA & et AL, 2002), les concentrations de plus de 0,5 mg/L et 0,02 mg/L respectivement de NO₃⁻ et PO₄³⁻ dans les eaux de surface, indiquent des niveaux de pollution qui peuvent causer une eutrophisation. Les valeurs moyennes de ces deux ions dans cette étude ont été plus élevées que la limite suggérée par (ZACHARIA & et AL, 2002). A long terme l'augmentation des concentrations en phosphate dans les eaux augmente la concentration d'organismes comme les algues et les lentilles des eaux, qui utilisent une grande quantité d'oxygène et entraîne un phénomène appelé l'eutrophication.

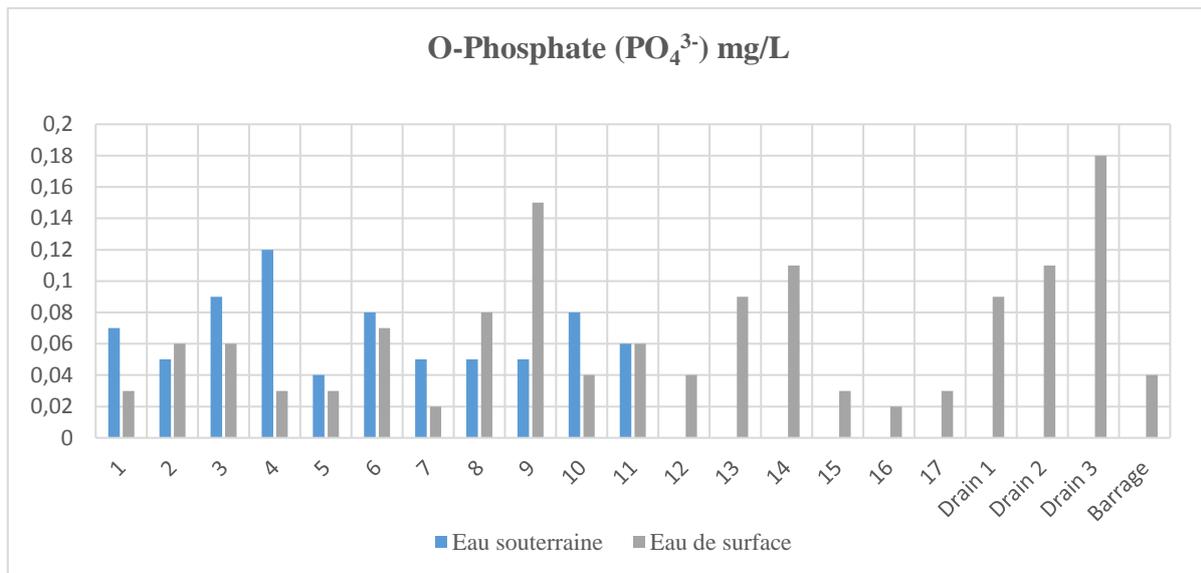


Figure 16. Evolution de l'ortho-phosphate au niveau de chaque point de prélèvement

➤ **Le Potassium K⁺**

Les valeurs de potassium varient significativement entre les eaux de surface et les eaux souterraines et sont comprises respectivement entre 1,66 et 6,11 mg/L pour les eaux souterraines et 1,66 et 8,88 mg/L pour les eaux de surface. Ces valeurs de potassium sont en deçà et en conformité avec les recommandations de l’OMS (12 mg/L). Le potassium est généralement moins abondant dans les eaux et ne dépasse généralement pas 10 mg/L. Une étude menée par (NOUAYTI et AL, 2015) dans le bassin de Ziz au Maroc a permis de trouver des valeurs faibles de potassium, de même que (OUANDAOGO, 2008) qui a trouvé des valeurs comprises entre 2,20 et 12,72 mg/L, pour les eaux de surface et 0,40 et 21,18 mg/L, pour les eaux de forages de la zone de Ouagadougou.

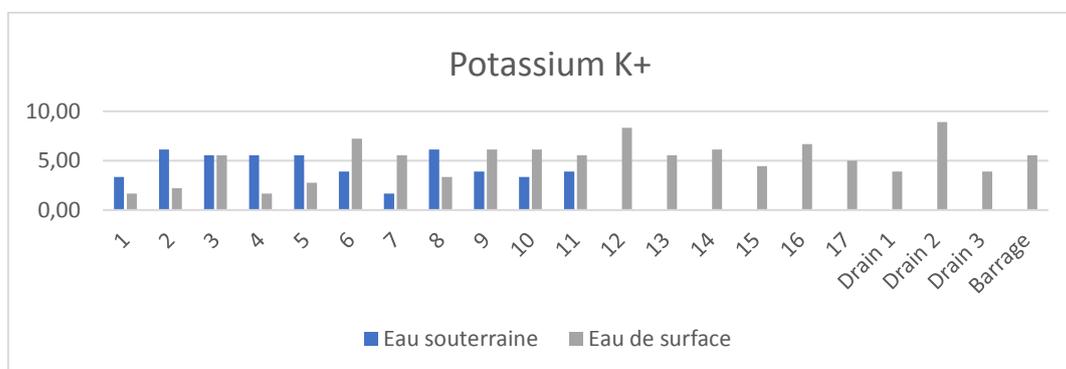


Figure 17. Evolution du potassium au niveau de chaque point de prélèvement

LES CORRELATIONS

Les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés. L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de corrélation déterminés par des calculs statistiques. La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de la valeur 1. Ainsi les corrélations ont été établies entre tous les éléments majeurs pris deux à deux ; ce qui nous a permis d'obtenir des diagrammes binaires de corrélation pour les interprétations. Les corrélations portent sur les résultats des analyses.

Tableau XVI. Matrice de corrélation des eaux souterraines (puits)

	PH	Conductivité	Phosphore PO ₄ ³⁻	Nitrates NO ₃ ⁻	Sulfates SO ₄ ²⁻	Potassium K ⁺
PH	1					
Conductivité	0,15	1				
Phosphore PO ₄ ³⁻	-0,35	-0,37	1			
Nitrates NO ₃ ⁻	0,09	0,92	-0,32	1		
Sulfates SO ₄ ²⁻	0,22	0,46	-0,17	0,48	1	
Potassium K ⁺	0,17	0,42	0,10	0,43	0,79	1

Tableau XVII. Matrice de corrélation des eaux de surface

	PH	Conductivité	Phosphore PO ₄ ³⁻	Nitrates NO ₃ ⁻	Sulfates SO ₄ ²⁻	Potassium K ⁺
PH	1					
Conductivité	-0,24	1				
Phosphore PO ₄ ³⁻	-0,10	0,06	1			
Nitrates NO ₃ ⁻	-0,14	0,34	0,24	1		
Sulfates SO ₄ ²⁻	-0,20	0,34	0,26	0,03	1	
Potassium K ⁺	-0,60	-0,29	0,16	-0,27	-0,04	1

Au regard des résultats de ces tableaux (Tableau XVI et Tableau XVII) on peut faire plusieurs remarques :

- Un lien très fort entre la conductivité et les nitrates

En effet on peut observer sur les (*Figure 13* et *Figure 14*) que pour les mêmes puits, lorsque la valeur de la conductivité augmente, le taux de nitrate est aussi élevé. La quantité de nitrates dans les eaux souterraines est directement liée aux quantités de fertilisants agricole azoté épandus sur la plaine. Le nitrate étant soluble, il s'infiltré dans le sol et peut atteindre facilement la nappe. La plaine étant située dans un bas-fond à proximité du barrage les recharges d'eau sont très fortes et expliquent les fortes concentrations dans les eaux de puit. La conductivité est une mesure indirecte de la teneur en sels dissous, les eaux étant riches en substances azotés, font augmenter la conductivité électrique d'où la forte corrélation entre les deux paramètres.

- Une bonne corrélation entre les sulfates et le potassium

La corrélation entre le sulfate et le potassium, s'explique par le fait que en agriculture au Burkina Faso, la majorité des engrais sont sous la forme de sulfate de potassium, les puits n'étant pas protégés les eaux de ruissellement peuvent s'y introduire.

- Un lien assez discret entre la conductivité, les nitrates et les sulfates.

DISCUSSIONS

La complexité dans la réalisation des cartes de vulnérabilité à la pollution réside dans le nombre de facteurs hydrogéologiques à prendre en compte. En effet plusieurs paramètres comme la conductivité hydraulique, la profondeur à la nappe, l'impact de la zone vadose, ont été produites par interpolation ce qui peut entraîner des erreurs dans la réalisation des cartes. Par ailleurs, l'une des difficultés de l'application des méthodes de cartographie de vulnérabilité est l'assignation des limites de classes et des cotes aux différents paramètres (KOUAME, 2007). En effet, les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude car ces classes peuvent regrouper en leur sein des entités différentes.

Le bilan de Thornthwaite nous a également permis de déterminer la recharge efficace sur la plaine mais les données sur le coefficient de ruissellement datent d'une étude (ORSTOM, 1961), avec les modifications climatiques, il se pourrait donc que la valeur du coefficient ait évolué au fil des années.

En dépit des différentes limites soulevées dans l'établissement des cartes de vulnérabilité à la pollution par les méthodes intrinsèques, et du calcul de la recharge efficace il n'en demeure pas moins que la carte de vulnérabilité intrinsèque est fiable. (KOUAME, 2007), a cité plusieurs travaux qui ont également abouti à une telle conclusion : ANANI (2006), FOFANA (2005), MURAT ET AL, (2003) ET MURAT (2000). Elle permet d'avoir une idée sur les zones sensibles qu'il va falloir prendre en compte dans le but de préserver ces zones d'éventuelle contamination par les activités agricoles.

Les cartes obtenues sont des outils d'aide à la protection des eaux, 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 vérifiés. Dans tous les cas, ces méthodes de vulnérabilité permettent de se faire une idée assez précise sur les zones sensibles d'une zone donnée en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

CONCLUSION

Au Burkina Faso, les cours d'eau utilisées pour développer des activités agricoles, montrent un risque actuel et une probabilité de pollution d'origine agricole de cette ressource déjà rare. L'étude d'impact cultural sur la qualité des eaux consécutives à l'utilisation des pesticides et des engrais sur la plaine de Boulbi a permis de mettre en évidence les mauvaises pratiques culturales et le niveau de contamination des eaux. Dans le cadre de notre étude, nous avons recensé les principaux pesticides et engrais (ANNEXE H), utilisés par les cultivateurs. Les résultats de l'enquête se sont avérés préoccupants car la grande majorité des produits phytosanitaires sont non homologués et de toxicité moyenne. Les résultats des analyses physico-chimiques obtenus et les observations sur la plaine, permettent d'affirmer que la qualité actuelle des eaux est normale et acceptable. Valeurs comprises entre : (8,7 - 6,9) pour le pH ; (271 - 136 $\mu\text{s/cm}$) pour la conductivité soit, 68 à 135.5 mg de sel dissous ; (0,18 - 0,02 mg/L) pour les phosphates ; (34,8 - 1,3 mg/L) pour le nitrate et respectivement (3 - 0 mg/L), (8,88 - 1,66 mg/L) pour le sulfate et le Potassium. Cependant, cette qualité se détériore de plus en plus au fil du temps et peut vite devenir mauvaise voire inquiétante. L'impact de la riziculture péri-urbaine sur la pollution des eaux a aussi nécessité : la caractérisation des paramètres hydrodynamiques du sol qui a fait ressortir le type de sol dominant sur la plaine de Boulbi, le type Argilo-limoneux, avec une conductivité hydraulique moyenne à saturation de 3.05mm/h, paramètre très important permettant d'établir la vitesse de transmission du polluant à la nappe. La recharge annuelle de l'aquifère représente environ 7% de la pluie. La cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la plaine de Boulbi selon les méthodes : DRASTIC, GOD et SI a permis de dresser le portrait de la défense naturelle de l'aquifère contre les pollutions. De cette étude il ressort que la nappe est faiblement vulnérable à la pollution dans son ensemble, avec des indices compris entre (83 et 88) pour la méthode DRASTIC, (0,35 à 0,42) pour la méthode GOD et (57,5 à 60) pour la méthode SI. Cela s'explique par la nature argileuse du sol, qui laisse s'infiltrer difficilement les polluants sur toute l'étendue de la plaine de Boulbi et aussi à la faible topographie sur la plaine, qui favorise le ruissellement. Cela permet de conclure que la pollution des eaux sur la plaine de Boulbi est faible, le taux de nitrates est également faible mais, il est nécessaire de prendre des mesures préventives dans le but de préserver ces eaux, car le constat pourra être différent dans un avenir très proche, sans compter que le risque de contamination due aux pesticides est très probable.

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATION

Bien que le Burkina accorde une priorité au secteur agricole, l'orientation de son champ d'action a des conséquences sur l'environnement et donc sur les ressources en eau. En effet comme dans beaucoup de pays en développement le Burkina Faso à une politique agricole sectorielle qui n'a d'autres buts que d'assurer l'autosuffisance alimentaire. Cette politique ne tient pas suffisamment compte des effets de l'agriculture sur l'environnement. Ce faisant, elle favorise la dégradation des sols et la contamination des cours d'eau et les nappes souterraines. La politique environnementale obéit aussi à cette démarche c'est-à-dire à une politique sectorielle : l'encadrement du monde paysans et le suivi agricole relève seulement de la compétence des institutions ayant en charge ce secteur et vis-versa. En conclusion la non-intégration des politiques agricoles et environnementales n'aide ni l'agriculture ni l'environnement et encore moins les ressources en eau déjà rares (YAO, 2008). Le Burkina doit, donc adopter une politique de gestion intégrée parmi les différents secteurs pour une amélioration plus efficiente de ces actions politiques.

Dans le cas particulier de la plaine de Boulbi, les eaux de surface constituent la principale ressource pour l'agriculture irriguée, cependant on assiste à une augmentation de l'exploitation des eaux souterraines pour pallier au déficit en eau pendant la contre saison. La plaine étant confrontée à de fortes recharges d'eau (remontées de la nappe), elle est propice à la pollution percolant de la surface. De ce fait des mesures, visant à assurer la qualité et la quantité des eaux de la nappe, doivent être prises dans le cadre d'une gestion des ressources en eau. Cette gestion nécessite la disponibilité de données fiables qui permettront une évaluation fine et adéquate des différents paramètres, en plus de l'implication directe des populations qui est nécessaire, pour une meilleure application.

Pour améliorer la qualité des eaux sur la plaine de BOULBI, et prévenir la pollution agricole nous recommandons de :

- Réaliser des analyses chimiques sur les eaux de la plaine dans le but de rechercher la présence de résidus de pesticides (métaux lourds).
- Réaliser des analyses physico-chimiques poussées pour déterminer les taux de (calcium, de magnésium, les chlorures, la dureté, etc...), car les eaux de puits sont consommées par les populations ;

- Une étude hydrologique complète du bassin versant en utilisant les données de plusieurs stations hydrométriques sur le bassin afin de déterminer le coefficient de ruissellement actualisé sur le bassin versant ;
- Mener une campagne de sensibilisation sur les risques liés à l'usage systématique des pesticides (risques de santé, perturbation de la biodiversité etc.) ;
- Mettre en place des formations adéquates pour les riziculteurs quant aux précautions d'usage des pesticides et aux bonnes pratiques agricoles ; et les inciter à s'approvisionner auprès des commerçants agréés et en produits homologués ;
- Effectuer des contrôles sur l'origine et la qualité des produits importés et disponibles sur le marché ;
- Encadrer l'usage des fertilisants et produits phytosanitaires, dans le respect des bonnes pratiques agricoles et le respect du code de l'environnement ;
- Renforcer les capacités des acteurs, notamment la formation sur l'utilisation des pesticides et engrais sur les méthodes alternatives (préparation et usage de biopesticides, méthodes mécaniques d'élimination des herbe etc...).
- Réaliser des forages et des essais de pompage de longue et courte durée pour déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de la zone (transmissivité, coefficient d'emmagasinement) ;
- Réaliser des piézomètres de suivi de la nappe sur le bassin versant, avec au moins 2 piézomètres sur le périmètre dont un (1) qui va capter la nappe phréatique et l'autre foré dans la nappe profonde ;

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDOULKADRI, A. M., & BOUBIE, G.** (2015). *Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso)*. Laboratoire de Chimie et des Matériaux, Equipe Chimie Physique et Electrochimie, Ouagadougou. Retrieved
- AGUIZA, & AL.** (2014). *Suivi de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux des cours d'eau de Ngaoundéré, au Cameroun*. Afrique SCIENCE 10(4).135-145P.
- ALLER, L., & AL.** (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological*.US: Environmental Protection Agency, EPA/600/2. 455P.
- BERRAH.** (2011). *Etude sur les pesticides*. Université de Tébessa Algérie.
- BESBES.** (2006). *Recharge des aquifères par les crues d'oueds*. Tunis.international association of hydrological sciences 302.43-72P
- CAROLINE, & et AL.** (2015). *agriculture nouvelle : l'atelier des curieux de l'agriculture*.
- CASTAIN, G., & et AL.** (2003). *Notice explicative de la carte Géologique au 1/200 000. Feuille ND-30-V de Ouagadougou*. 1ère édition.
- CASTANY, G.** (1962). *Réserves en eaux souterraines*. Hydrological sciences journal.
- CHAOUKI.** (2016-2017). *Cour pollution (air, eau, sol)*. Université Kasdi Merbah Ouarla, faculté des sciences appliquées, département de génie des procédés.50P
- CHAPMAN, D., & KIMSTACH, V.** (1996). . *Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring*, Chapman. edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126P.
- CHI ANH TA.** (1997). *Effet des fibres alimentaire sur la mise en disponibilité des résidus de pesticides retrouvés dans la diète*. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'université Laval pour l'obtention du grade de maître des sciences.78P
- CILSS.** (1999). *Reglementation commune aux états membres du CILSS sur l'homologation des pesticides (version révisée) Bamako*. 30P

- CONGO, A. K.** (2013). *risques sanitaires associes a l'utilisation de pesticides autour de petites retenues : cas du barrage de loubila* memoire pour l'obtention du dilome d'ingénieur. Plan de gestion des pestes et pesticides, 1. (PAPSA)
- DAKOURE, D.** (2003). *Eude hydrogéoloique et géochimique de la bordure Sud-Est du bassin sédimentaire de TAOUDENI (BURKINA FASO - MALI)*.Essai de modélisation. Université Paris VI - Pierre et Marie Curie.
- DARA, A.** (2017). *Caractérisation des processus de recharge d'un aquifère fracturé en milieu de socle sous climat sahelien: cas du site de Tougou (region du yatenga auBurkina faso)*. Master d'ingénierie, 2iE, Ouagadougou.135P
- DGPER.** (2012). *Résultats définitifs de la campagne agricole et de la situation alimentaire et nutritionnel 2011-2012*. Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique, Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale.
- DIOP, A.** (2013). *Diagnostic Des Pratiques D'utilisation et Quantification Des Pesticides Dans La Zone Des Niayes de Dakar (Sénégal)*. Thèse de Docteur des-Sciences, Université du Littoral Côte d'Opale, 240P.
- DJIBO HAHIU, T.** (2020). *etude d'impact des activites culturelles sur la qualite des eaux du sous bassin barrage de tougou : caracterisation physico-chimique*. Institut international de l'eau et de l'environnement 2iE.79P
- FAO.** (2003). *les engrais et leur application précis à l'usage des agents de vulgarisation agricole. institut mondial du phosphate. association international de l'industrie des engrais*.
- FAO.** (2006). *Manual of the development and use of fao an who specifications for pesticides, revision of the first edition. rome, food and agriculture organisation of the united nations an genova, wordl health organization march*.
- FAO.** (2018). *organisations des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. QUEBEC précurseur d'eutrophisation des eaux du barrage n°3 de Ouagadougou Burkina faso*.
- FIDELE, & et AL.** (2012). *Etude de l'évolution des éléments précurseurs d'eutrophisation des eaux du Barrage n°3 de Ouagadougou, Burkina Faso*.

- GOUGO, A. K.** (2016). *Etude de la vulnérabilité à la pollution agricole de l'aquifère alluvial de Karfiguela (BANFORA, BURKINA FASO)*. Ouagadougou: Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- HAMMAMI , & et AL.** (2005). *Essai d'évaluation de la qualité des eaux de ruissellement du bassin versant de la lagune de Bizerte*. Bull l Inst Natl des Sci Technol la Mer.50P
- IWACO.** (1993). *Carte hydrogéologique du BURKINA FASO*. Ouagadougou: Direction de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques (DIRH).
- JOUDA, J., & et AL.** (2007). *Evaluation du degré de protection des eaux souterraines, vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (sud est cote d'ivoire) par la methode DRASTIC*.11P
- KEITA, A.** (2008-2018). *cours irrigation par aspersion*. Institut international de l'eau et de l'environnement 2iE.181P
- KHEMIRI, S., & AL.** (2013). *Using GIS for the Comparison of Intrinsic Parametric Methods Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in Scenarios of Semi-Arid Climate. The Case of Foussana Groundwater in the Central of Tunisia;.* *Journal of Water Resource and Protection*,, 5. 835-845P.
- KONE, & AL.** (2009). *Etude de la pollution des eaux par les intrants agricoles : cas de cinq zones d'agriculture intensive du Burkina Faso*.
- KOUAME, K. J.** (2007). *Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution*. Thèse de doctorat, Université de Cocody.60P
- LEONARD, & CHENG.** (1990). *Movement of pesticides into surface water. pesticide in the soil environnement: processes, impacts and modelling*. 303-349P
- MAHAMANE, A., & et AL.** (2015). *caractérisations physico chimiques des eaux souterraines dans la localité de yamtenga au burkina faso*.Vol 9.n°1.17P
- MAPAQ.** (1995). *Examen des projets de distribution au quebec d'eau embouteillé importée*. centre quebecois d'inspection des aliments et de la santé.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DES RESSOURCES HYDRAULIQUES, DE L'ASSAINISSEMENT ET DE LA SECURITE ALIMENTAIRE (MARHASA), (2015).

Données pluviométriques des campagnes agricoles 2003-2019 BURKINA FASO. 18P.

MOIROUX, N. (2006). *Des bassins versants aux écosystèmes aquatiques: développement d'un système d'information géographique sur le bassin du Narialé au BURKINA FASO.* Rapport de stage Master 2 : aménagement du Territoire et Télédétection, Université Paul Sabatier, Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, 13 avenue du Colonel Roche,31062 Toulouse cedex 9. 32P

MOUGEOT, L. (2000). *Cultiver de meilleurs villes, Agriculture Urbaine et Développement Durable.* Centre de recherche pour le developpement international, Ottawa,Canada K1G3H9. 137P

MOUSSA NOMANO. (2017). *Evaluation de la qualité physico-chimique et bacteriologique des eaux des forages à usage particulier et semi-industriels à Ouagadougou (Burkina Faso).* Rapport de mémoire, Laboratoire Nationale de Santé Public (LNSP), Ouagadougou. 47P

MURAT, V., & AL. (2000). *Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont LAURENTIEN.* Québec, AIHCNC et SCG,. 411-418P.

OKOUNDE, T. (2006). *Etude des impacts environnementaux et sanitaires de l'utilisation des engrais et pesticides dans les périmètres irrigués de Mogtédou au Burkina Faso.* Ouagadougou, Burkina Faso. Mémoire de fin d'études d'ingénieur / EIER, Ouagadougou, Burkina Faso, 81 P.

ORSTOM. (1961). *Etude hydrologique de bassins versants dans la region de ouagadougou.*101P

OUANDAOGO, S. (2008). *Ressources en eau souterraine du centre urbain de ouagadougou au Burkina Faso, Qualité et vulnérabilité.* These de doctorat.456P

PIERRE, & MAYER, H. (2017). *Phosphore, azote et prolifération des végétaux aquatiques.*

RECOUS, & et AL. (1995). *Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines.*

- RODIER, & AL.** (1996). *L'analyse de l'Eau*. 8^e édition. . 8^e édition. Dunod : Paris. 1384 pp. 1996.
- SIMBORO.** (2015). *Gestion quantitative et qualitative des ressources en eau dans la plaine alluviale de Karfiguéla à l'aide d'un SIG : Etude de la recharge induite de la nappe et sa vulnérabilité à la pollution*. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur avec grade de master, institut 2Ie. 75P
- SNDR.** (2011). *Stratégie nationale de développement de la riziculture. Burkina Faso*.
- SOME, K., & et AL.** (2008). *Pollution agricole des eaux dans le bassin du Nakambé: cas des réservoirs de Loumbila et de Mogtedo au Burkina Faso*. Institut de l'environnement et de recherche agricole, sud sciences et technologies n°16, ouagadougou bp 476.14-22P
- TAPSOBA, & AL,** (2012). *Etude de l'évolution des éléments*.
- TEPE, Y., & BOYD, A.** (2003). *Reassessment of nitrogen fertilization for sunfish ponds*. J Word aquac Soc;34(4):.
- TOE, A.** (2007). *Utilisation des pesticides chimiques en cultures maraichères et cotonnières dans la région est du burkina faso. campagnes 2005-2006 et 2006-2007*. rapport d'étude.
- TOE, A., & et AL.** (2004). *Le non respect des bonnes pratiques agricoles dans l'utilisation de l'endosulfan comme insecticide en culture cotonnière au Burkina Faso : quelques conséquences pour la santé humaine et l'environnement*. Revue Africaine de Santé et de Productions Animales, 2004, vol. 2, N°3-4.
- USTAGLU, F., TEPE, Y., & et AL.** (2019). *Investigation of Water Quality and Pollution Level of Lower Melet River, Ordu. Turkey*.
- USTAOGU, F., & TEPE, Y.** (2019). *Water quality and sediment contamination assessment of Pazarsuyu Stream, Turkey using multivariate statistical methods and pollution indicators*. Int Soil Water
- VAN DER WERF, H.** (1997). *Evaluer l'impact des pesticides sur l'environnement*. Cour environnement 31:5. 5-22P

VRBA, & ZAPOZOZEC, A. (1994). *Groundwater vulnerability for the surface outcropping aquifers in Jordan*. International contributions to hydrogeology, 16 FRG,, Heise publication, Hannover.

YAO, K. (2008). *Impacts des polluants agricoles sur les ressources en eaux au Burkina, Quelles mesures préventives*. Mémoire pour l'obtention du mastère spécialisé en WASH, Institut international de l'eau et de l'environnement (2iE), , Ouagadougou. 72P

ZACHARIA, & et AL. (2002). *Limological overviews. Lakes Reserves Mana*.

SITES INTERNET CONSULTES

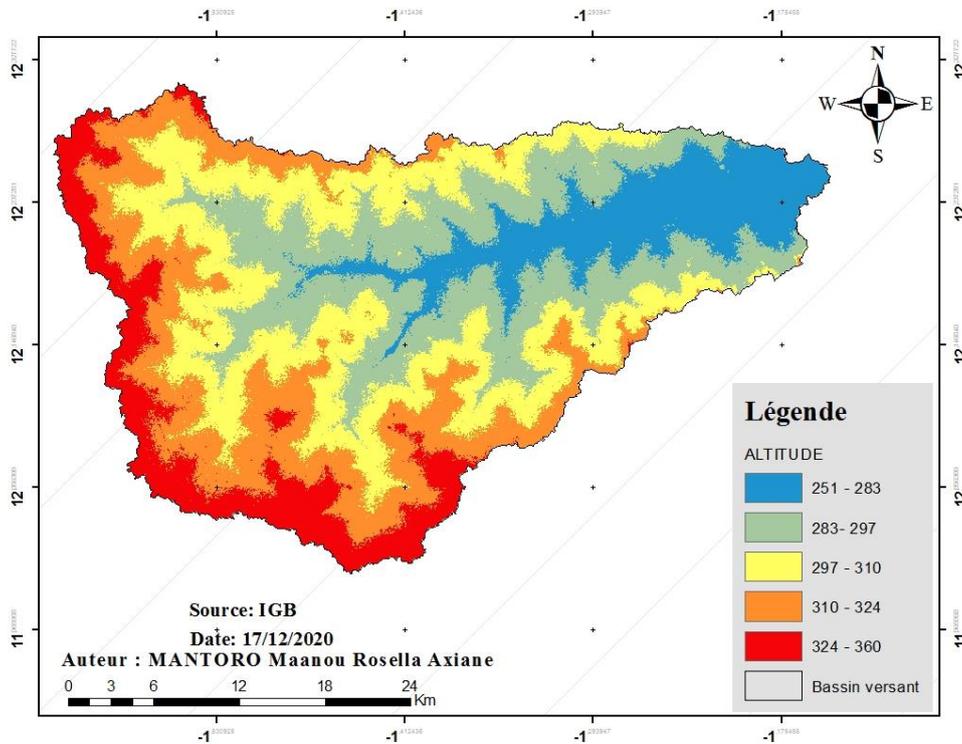
- <http://espace.inrs.ca/id/eprint/326/1/Tg00006.pdf> Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. 291P. Consulté le 10/05/2020
- <http://awn-solutions.iwni.org> consulté le 24/08/2020
- <http://agritrop.cirad.fr> consulté le 25/08/2020
- <http://journals.openedition.org> consulté le 24/08/2020
- <http://Riceforafrica.net> consulté le 07/09/2020
- <http://www.usherbrooke.ca> consulté le 09/09/2020
- <http://iuf.org.www> consulté le 15/09/2020
- <http://iau-idf.fr> consulté le 15/10/2020
- <http://ajol.info> consulté le 20/11/2020

ANNEXES

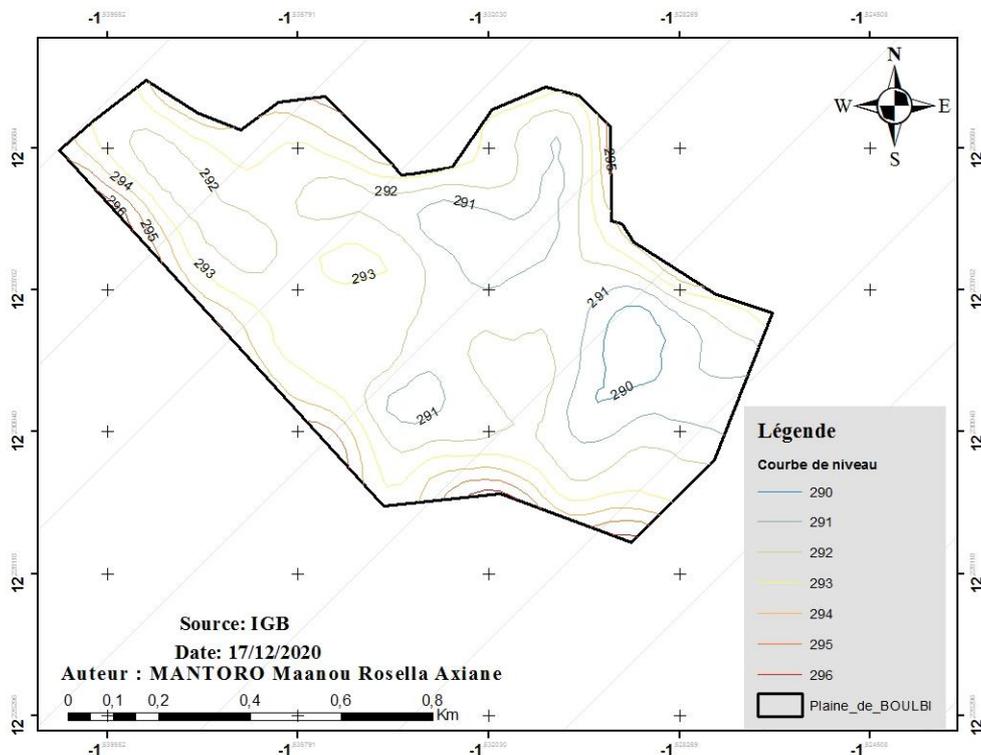
ANNEXE A.CARTOGRAPHIE.....	II
ANNEXE B.DETERMINATION DES PARAMETRES PHYSICO CHIMIQUE.....	IV
ANNEXE C.LOGS DE FORAGE	VII
ANNEXE D. CHOIX DU FACTEUR CORRECTIF, RESULTATS DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERNCE	IX
ANNEXE E. ALGORITHME DE THORNTHWAITE	XI
ANNEXE F.GRAPHIQUES DE DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE	XIII
ANNEXE G.ORGANIGRAMME, COTES ET METHODES D'EVALUATION DES PARAMETRES DRASTIC, GOD ET SI	XVI
ANNEXE H. INFORMATION DETAILLEE SUR LES PESTICIDES RECENSES SUR LA PLAINE.....	XVIII
ANNEXE I. FICHE D'ENQUETE.....	XIX

ANNEXE A.CARTOGRAPHIE

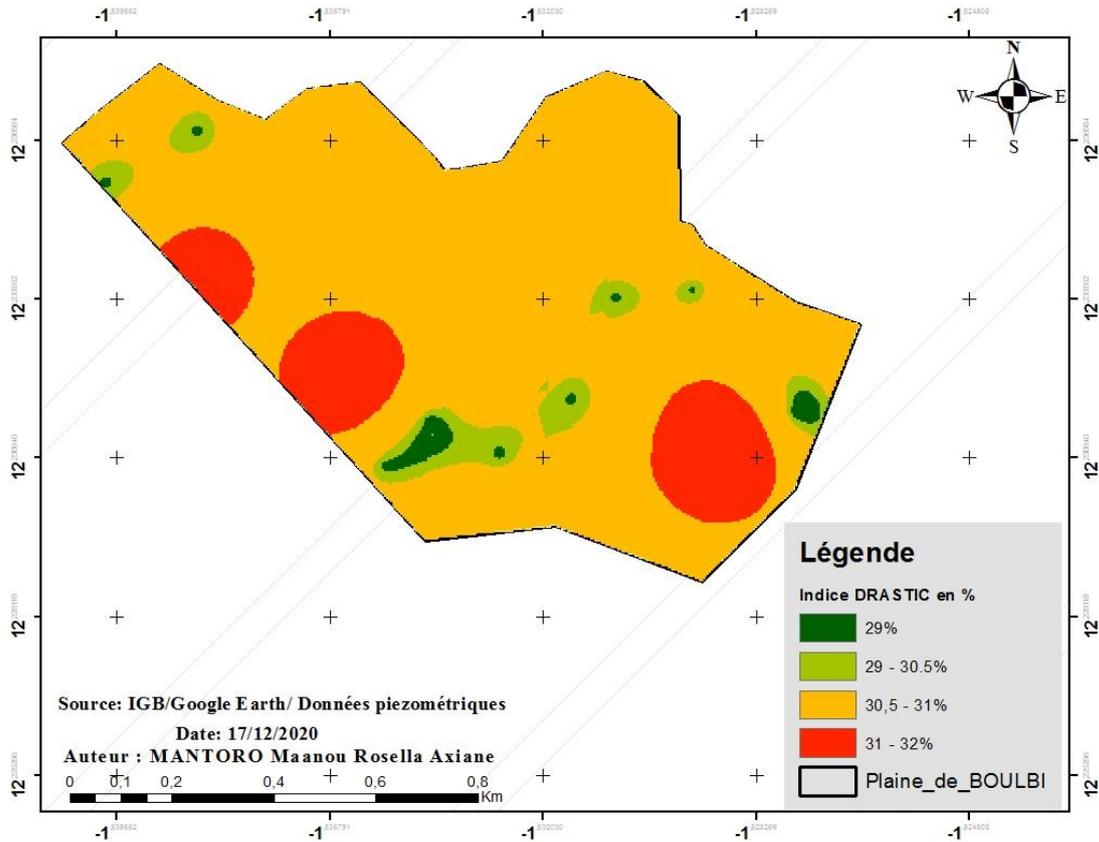
A1.Carte des altitudes du bassin versant



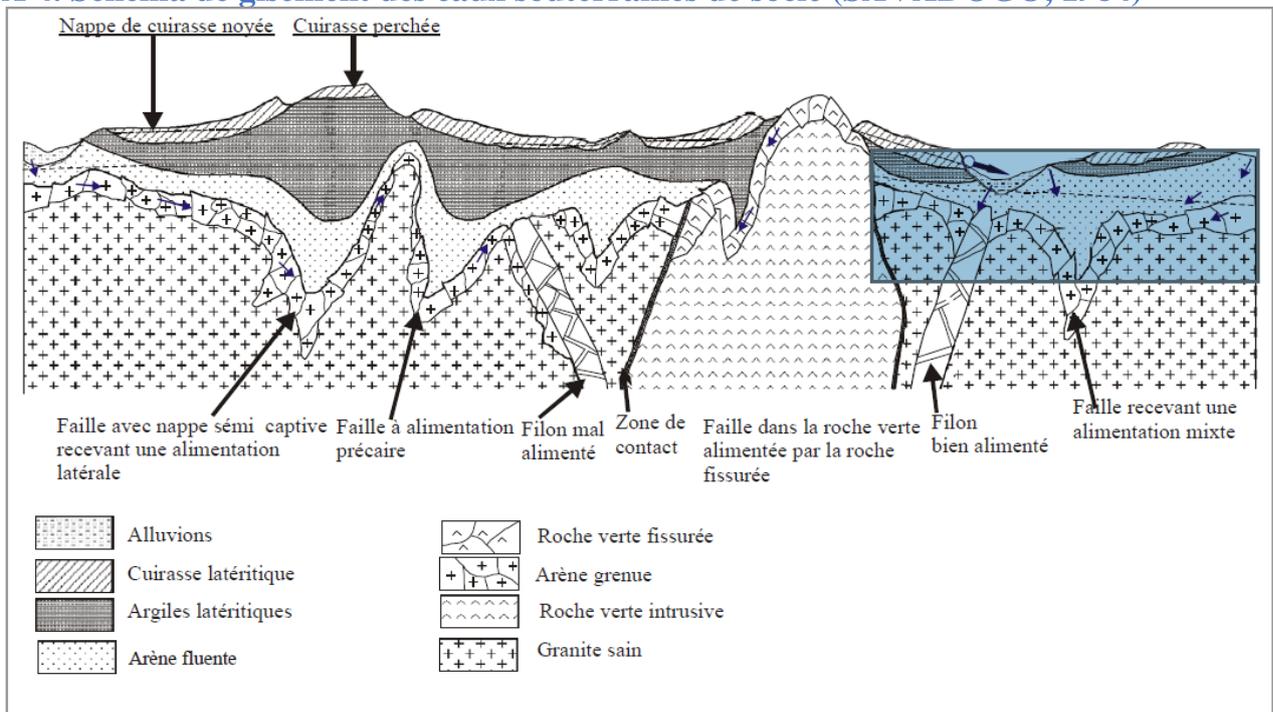
A 2.Carte des courbes de niveau de la plaine



A 3. Carte des indices DRASTIC en pourcentage



A 4. Schéma de gisement des eaux souterraines de socle (SAVADOGO, 1984)



ANNEXE B.DETERMINATION DES PARAMETRES PHYSICO CHIMIQUE

B 1.Directives admises par l'OMS

La qualité de l'eau destinée à la consommation humaine doit être conforme aux teneurs suivantes (OMS, 2008) :

Paramètre	Concentration maximales admissibles
Paramètres généraux	
pH	6,5-8,5
Ammoniac	1,5 mg/L
DBO5	50 mg/L
Chloride	250 mg/L
Fluorure	1,5 mg/L
Hydrogène sulfuré	0,05 mg/L
Nitrates (NO ₃ ⁻)	50 mg/L
Nitrite (NO ₂ ⁻)	3 mg/L
Sulfate	250 mg/L
Solides total dissous (TDS)	1000 mg/L
Métaux Aluminium	0,2 mg/L
Antimoine	0,005 mg/L
Arsenic	0,01 mg/L
Baryum	0,7 mg/L
Bore	0,5 mg/L
Cadmium	0,003 mg/L
Chrome, total	0,05 mg/L
Cuivre	0,3 mg/L
Fer	1 mg/L
Plomb	0,01 mg/L
Magnésium	150 mg/L
Manganèse	0,5 mg/L
Mercure	0,001 mg/L
Molybdène	0,07 mg/L
Nickel	0,02 mg/L

B 2. Détermination du Ph et de la conductivité électrique

Ces paramètres ont été mesurés in situ :

- Plonger le pH-mètre et Conductimètre WTW 3310 et WTW 3110 dans les échantillons déjà prélevés (chaque paramètre a été mesuré 2fois).
- Appuyer « AR » puis « ENTER » et attendre jusqu'à stabilisation des valeurs du pH, de la conductivité, de température, puis Relever la valeur du pH de la conductivité

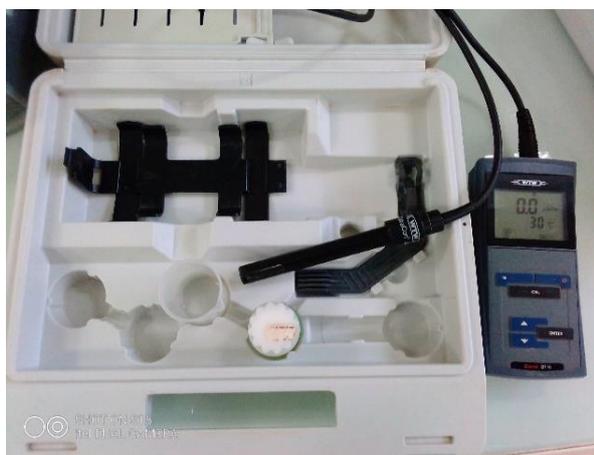


Figure 18. PH-mètre WTW 3310



Figure 19. Conductimètre WTW 3110

B3. Détermination du nitrate, de l'ortho-phosphate et du sulfate par la méthode de spectrophotométrie, et du potassium par spectrométrie à flamme

Les appareils utilisés pour la lecture de ces paramètres sont le spectrophotomètre HACH DR 3900 et spectromètre à flamme SHERWOOD 410.

Paramètres	N-NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Réactifs	Nitraver	Sulfaver	Phosver
Volume d'échantillon filtré à prélever (ml)	10	10	10
Volume de réactifs à introduire (ml)	10	10	10
Programmes	355	380	490
Temps d'agitation	1minute	30 secondes	30 secondes
Temps de réaction (minute)	5	20	2



Figure 20. Pompe à vide



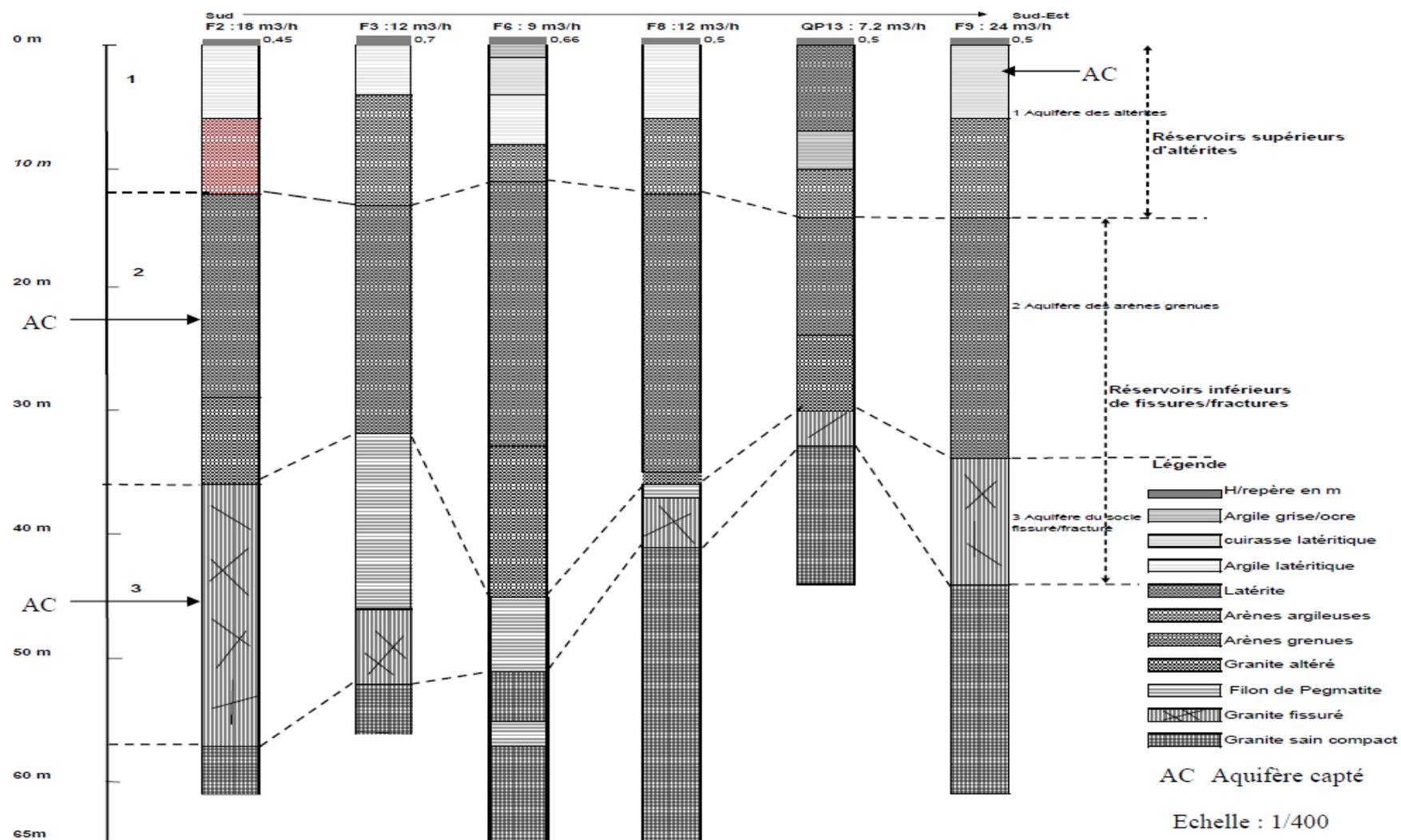
Figure 21. Spectromètre DR 3900



Figure 22. Spectromètre à flamme

ANNEXE C.LOGS DE FORAGE

« IMPACT DE LA RIZICULTURE PERI-URBAINE SUR LA POLLUTION DES EAUX : CAS DE BOULBI DANS LA PROVINCE DU KADIOGO AU BURKINA FASO »



**ANNEXE D. CHOIX DU FACTEUR CORRECTIF, RESULTATS DE CALCUL DE
L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE**

D 1.Choix du facteur correctif F(λ) dans la formule Thornthwaite

(<http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/sites/default/files/users/lcaillou/facteur%20f.png>)

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.00	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

D 2. Calcul de l'évaporation avec la formulé de Thornthwaite

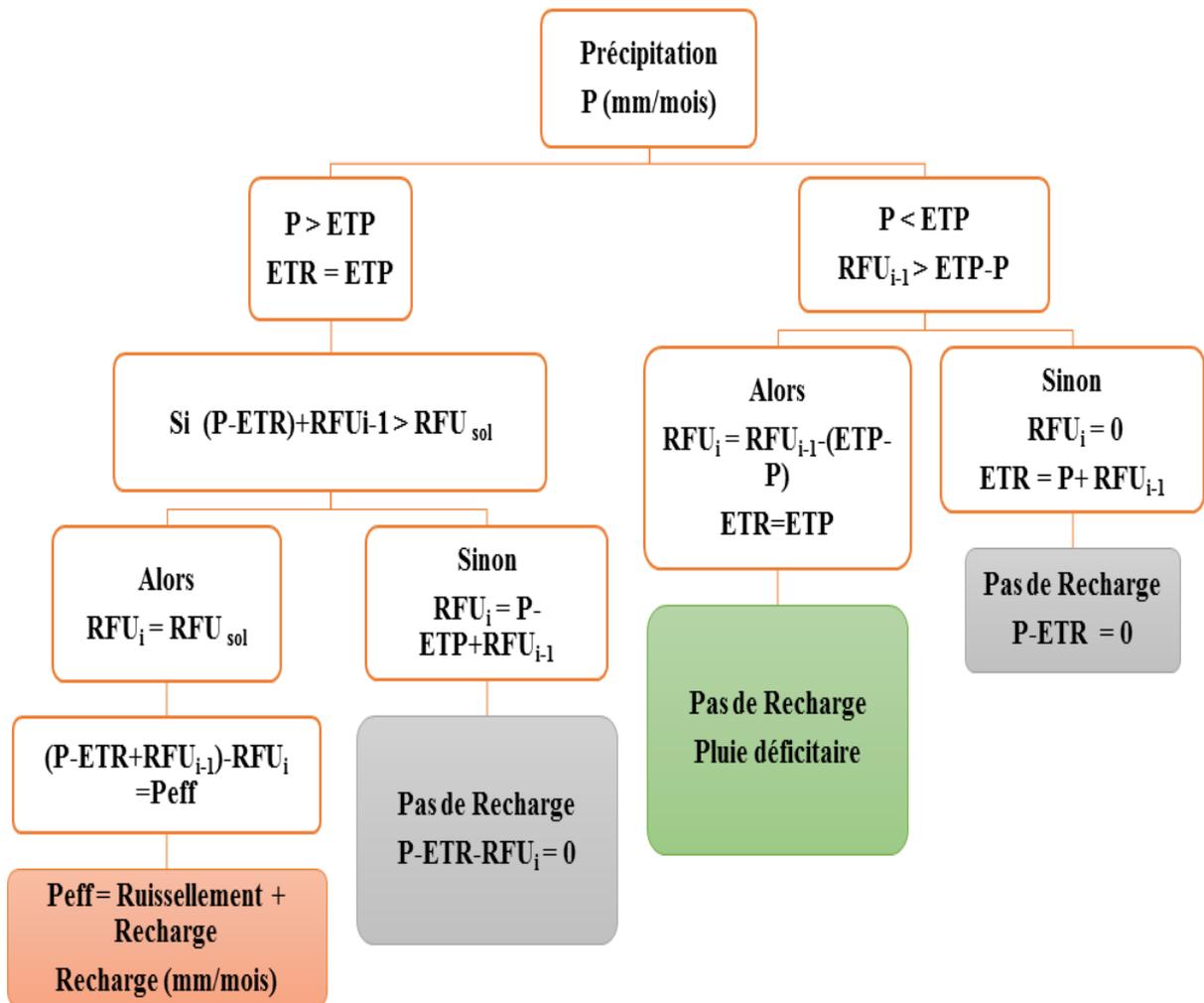
MOIS	Temp (°)	Im	I	a	F(alpha)	ETO (mm)
Janv-19	28,5	13,94	194,88	3,62	0,988	62,54
Févr-19	29,5	14,69			0,91	65,25
Mars-19	33,5	17,81			1,03	117,00
Avr-19	36,5	20,28			1,034	160,20
Mai-19	35,5	19,44			1,092	153,00
Juin-19	34	18,21			1,068	128,00
Juil-19	31	15,84			1,096	94,04
Août-19	28	13,58			1,074	63,76
Sept-19	30	15,07			1,02	77,73
Oct-19	30,5	15,45			1,016	82,19
Nov-19	32	16,62			0,968	93,17
Déc-19	28,5	13,94			0,982	62,16

ANNEXE E. ALGORITHME DE THORNTHWAITE

Le principe de calcul doit permettre à la pluie d'alimenter en priorité l'ETP (Evapotranspiration potentielle), puis de compléter la RFU (Réserve Facilement Utilisable) jusqu'à son maximum, et enfin d'alimenter l'infiltration et le ruissellement lorsque l'ETP et la RFU sont satisfaites. L'algorithme de Thornthwaite est le suivant selon (DAKOURE, 2003).

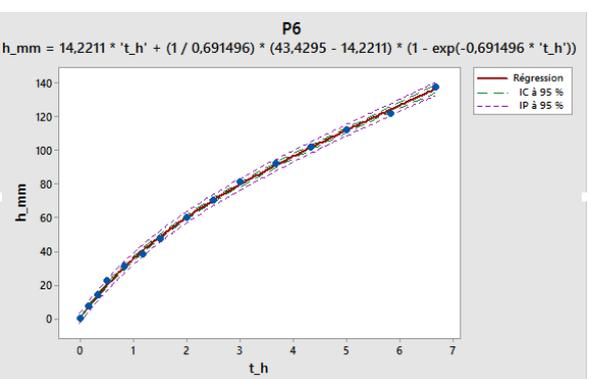
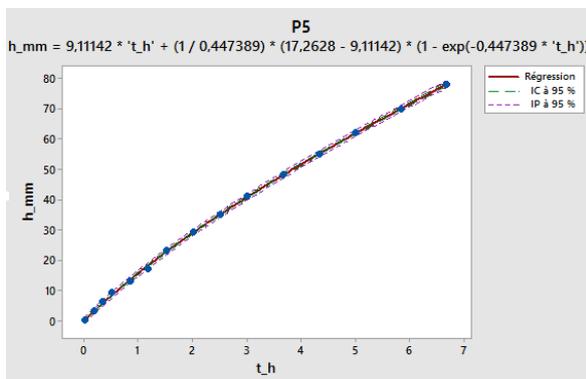
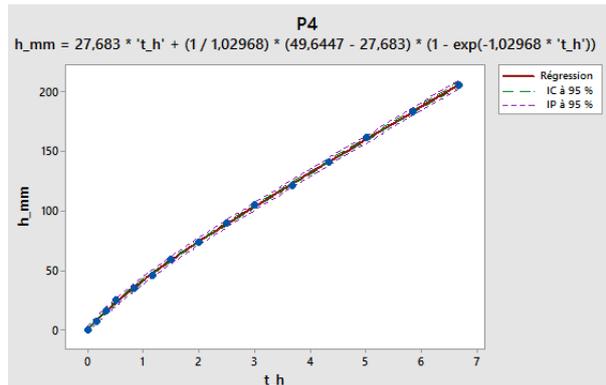
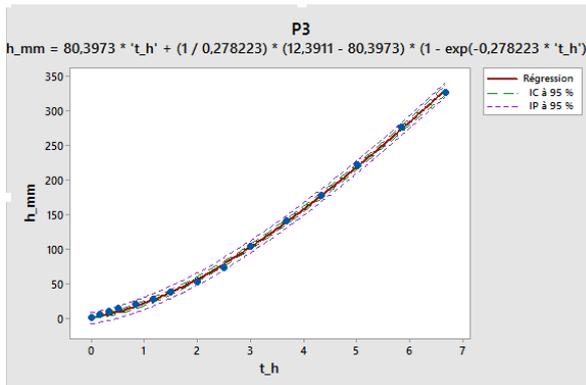
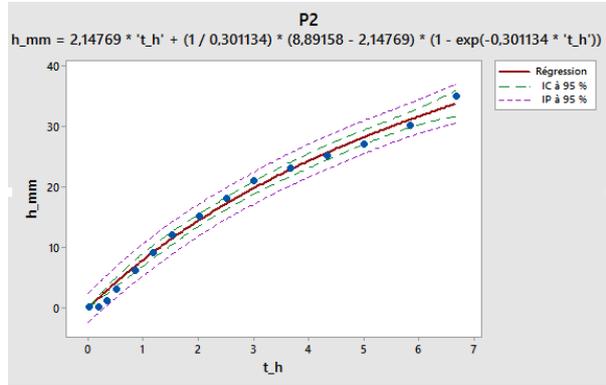
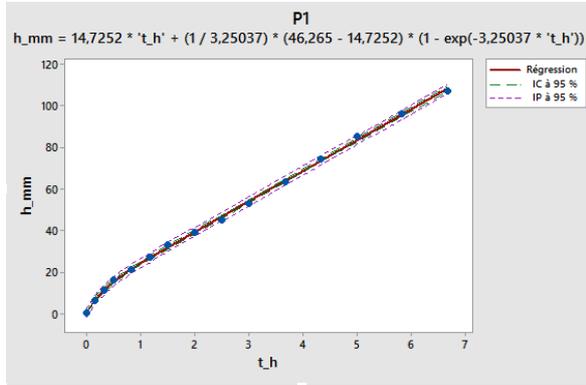
- **Si les précipitations du mois sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle ($P > ETP$)**
 - L'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle ($ETR = ETP$) ;
 - L'excédent des précipitations sur l'évapotranspiration potentielle est emmagasiné dans l'humidité du sol dont il augmente les réserves jusqu'à ce que ce dernier soit saturé (atteigne la RFU) ;
 - La partie de l'excédent dépassant éventuellement la réserve cumulée constitue le « water surplus » disponible pour l'alimentation de la pluie efficace (Ecoulement de surface + infiltration dans la nappe profonde).
- **Si les précipitations du mois sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle ($P < ETP$),**
 - Si la réserve antérieure d'humidité du sol est assez forte pour combler l'insuffisance des précipitations, l'évapotranspiration réelle (ETR) est encore égale à ETP ; les réserves du sol sont alors réduites de la différence : $ETP - P$
 - Si la réserve d'humidité du sol est insuffisante pour satisfaire ETP, alors ETR reste inférieure à celle-ci et est égale à la somme de : $P + RFU_{sol}$

Nous avons résumé l'algorithme sous forme d'organigramme présenté ci-dessous :

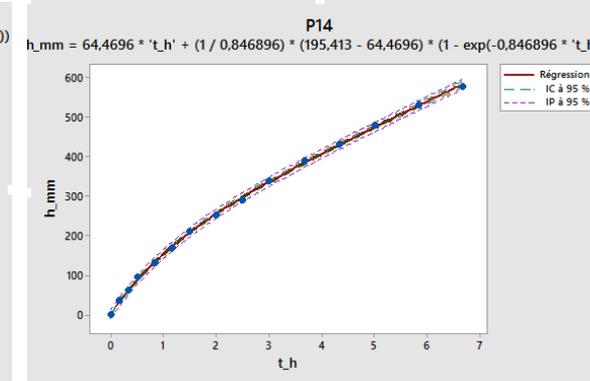
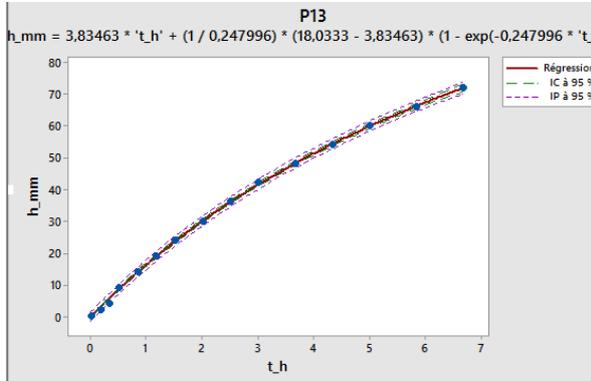
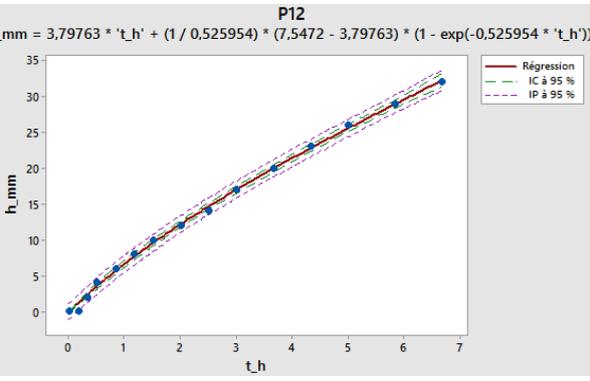
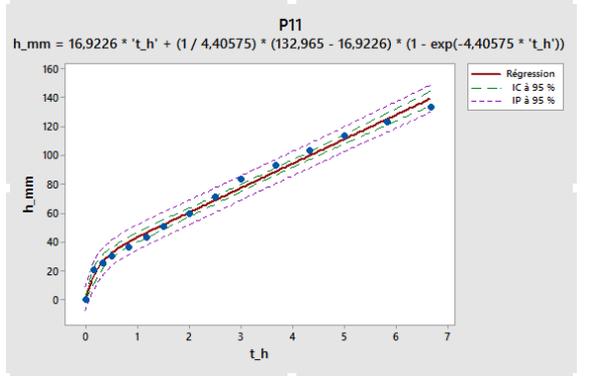
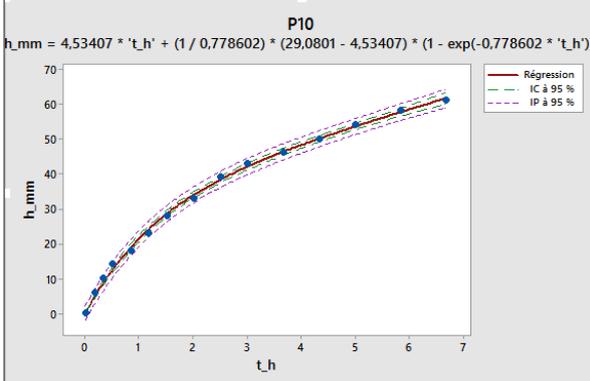
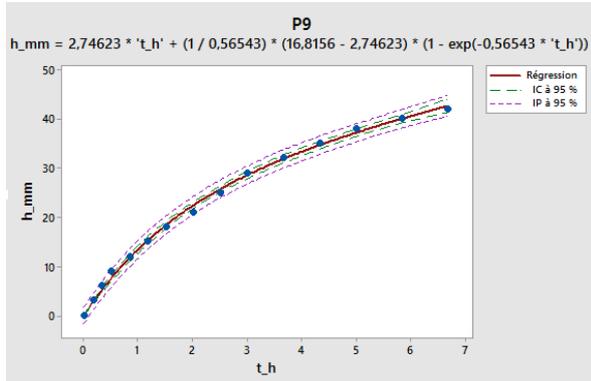
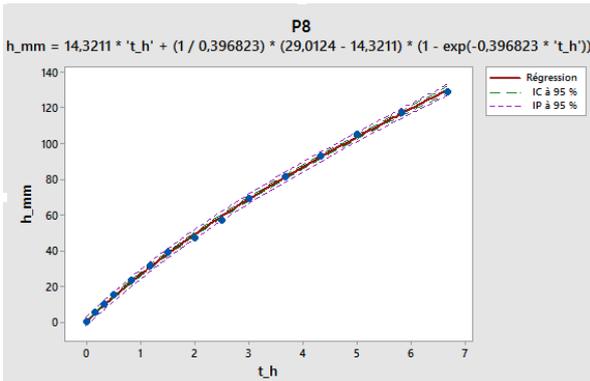
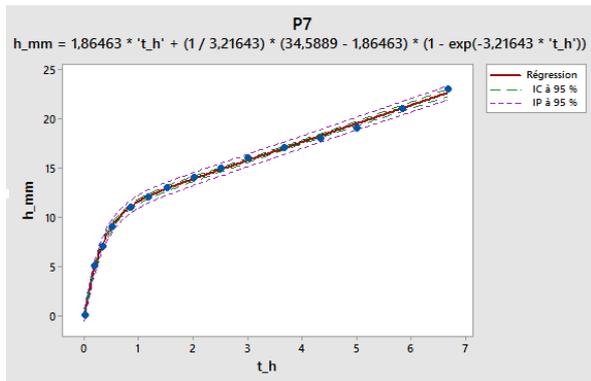


ANNEXE F.GRAPHIQUES DE DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE

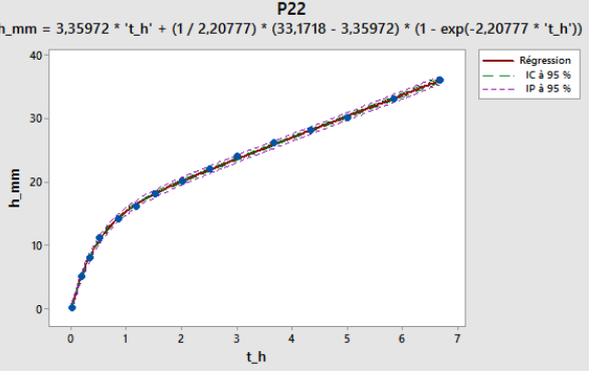
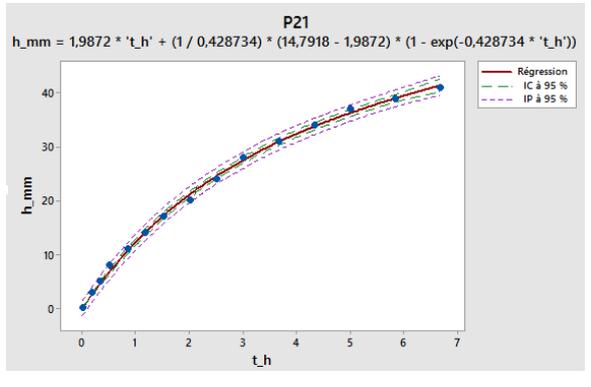
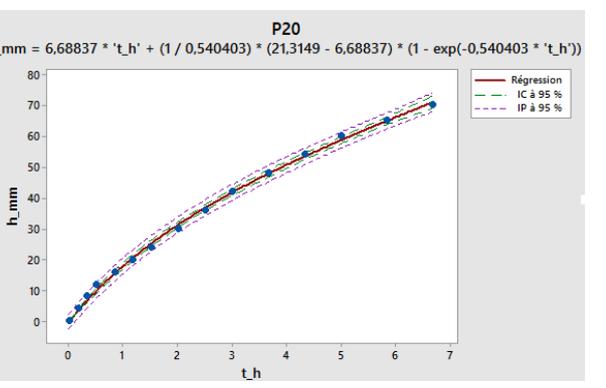
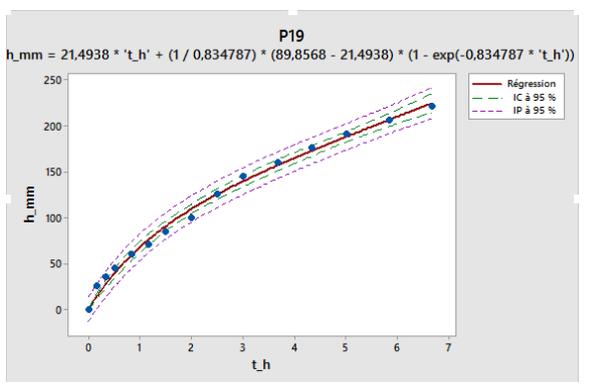
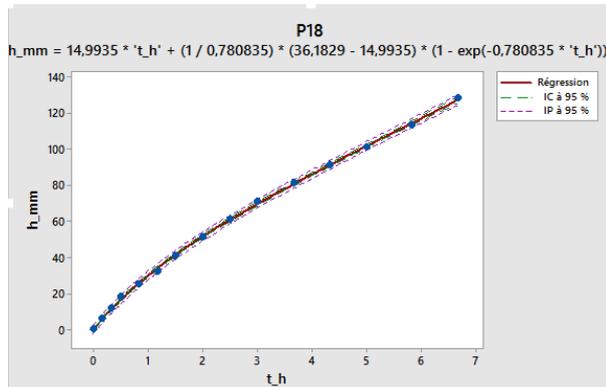
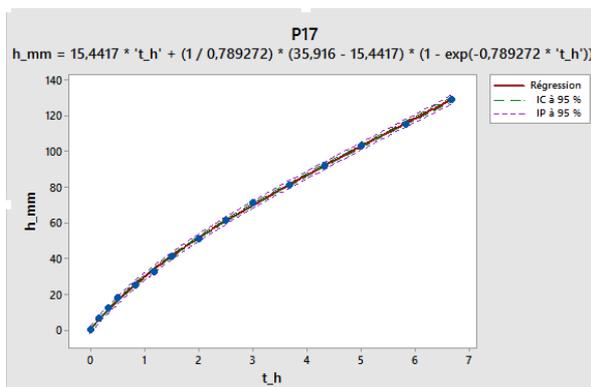
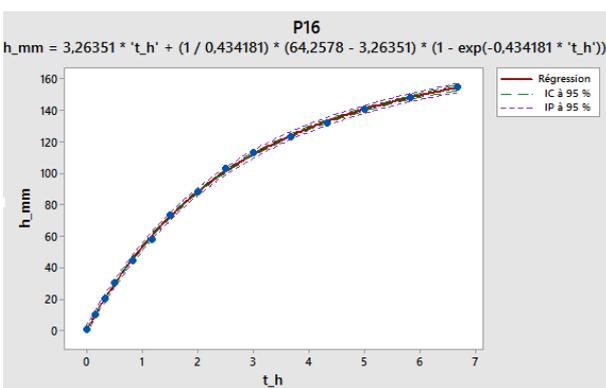
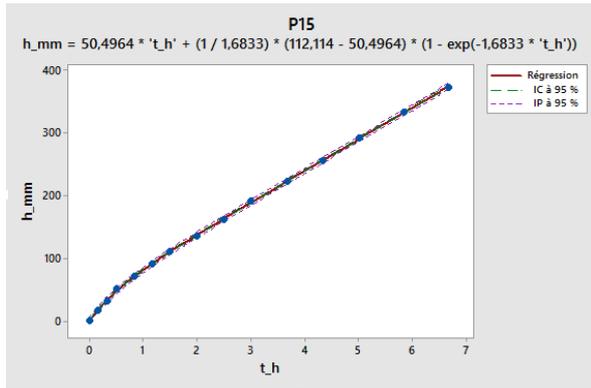
HYDRAULIQUE A SATURATION



« *IMPACT DE LA RIZICULTURE PERI-URBAINE SUR LA POLLUTION DES EAUX : CAS DE BOULBI DANS LA PROVINCE DU KADIOGO AU BURKINA FASO* »

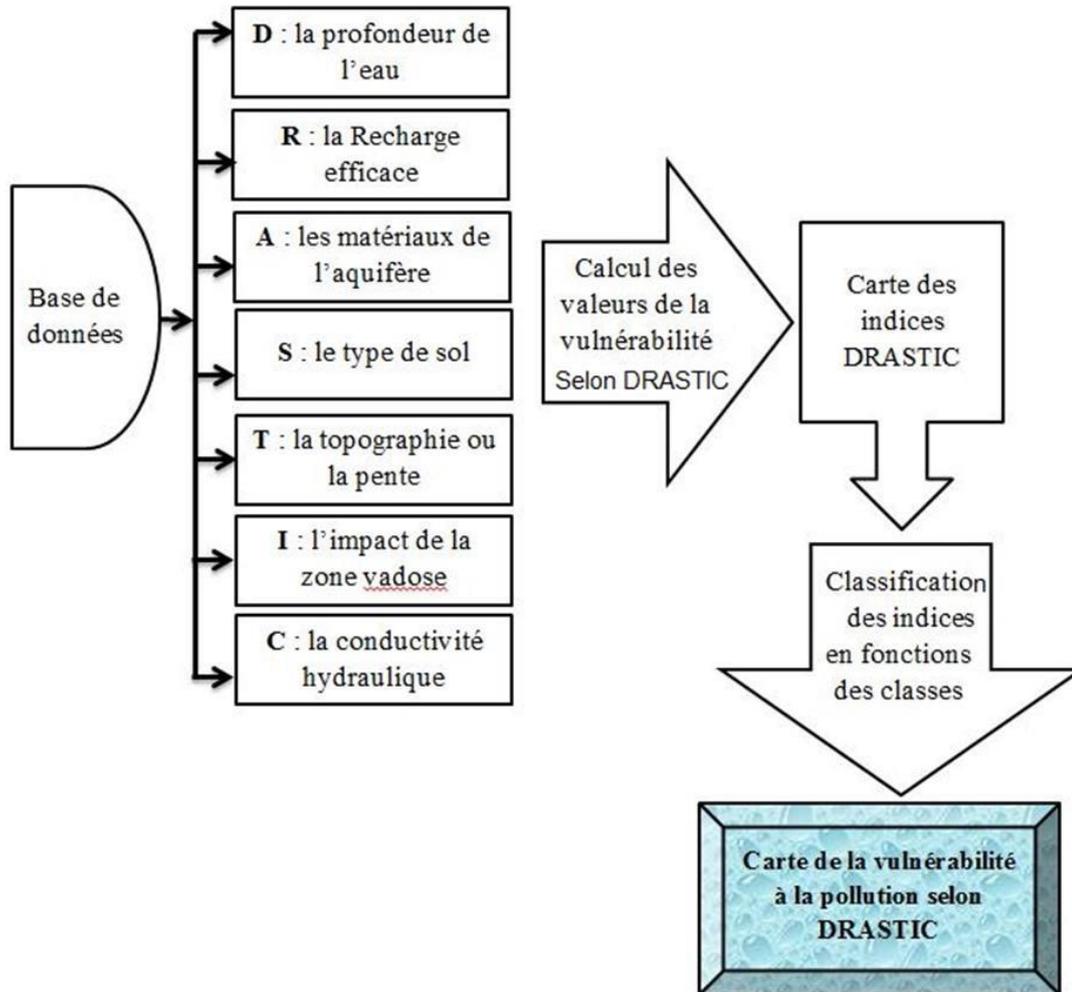


« *IMPACT DE LA RIZICULTURE PERI-URBAINE SUR LA POLLUTION DES EAUX : CAS DE BOULBI DANS LA PROVINCE DU KADIOGO AU BURKINA FASO* »

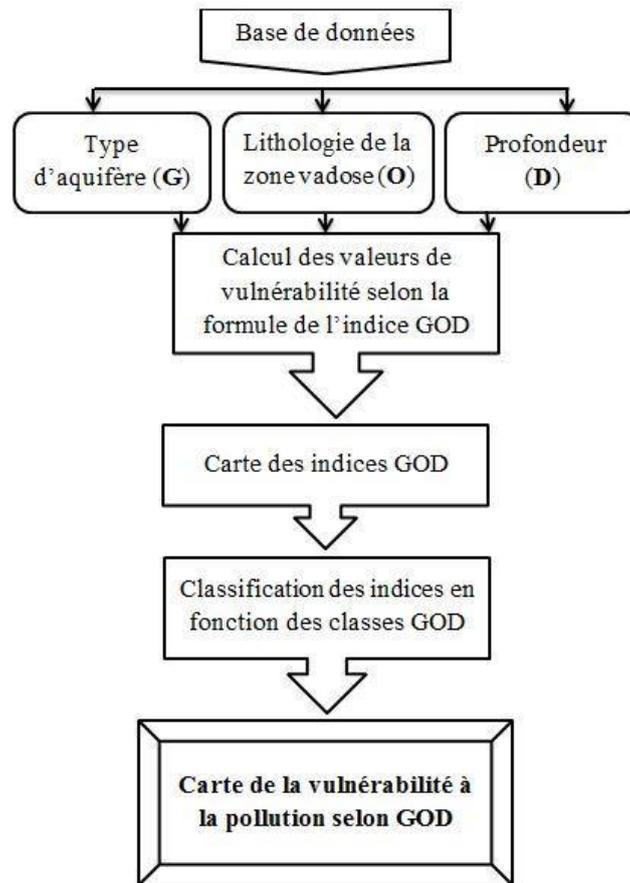


ANNEXE G.ORGANIGRAMME, COTES ET METHODES D'EVALUATION DES PARAMETRES DRASTIC, GOD ET SI

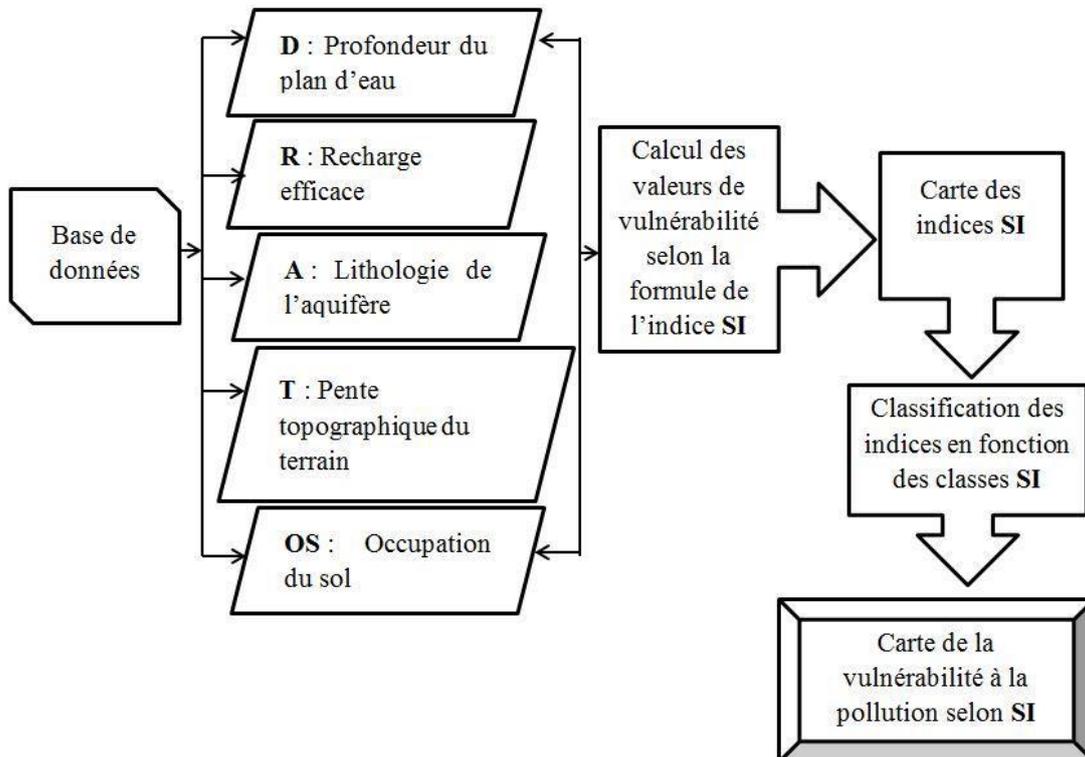
G 1.Organigramme de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC



G 2.Organigramme de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode GOD



G 3. Organigramme de réalisation de la carte de vulnérabilité selon la méthode SI



L'outil ArcGIS 10.3.1 a été utilisé pour les interpolations « IWD », la classification « Reclassify » en fonction des intervalles définies par (MURAT et AL, 2013) et la cartographie de chaque paramètres DRASTIC, GOD et SI.

ANNEXE H. INFORMATION DETAILLEE SUR LES PESTICIDES RECENSES SUR LA PLAINE

« *IMPACT DE LA RIZICULTURE PERI-URBAINE SUR LA POLLUTION DES EAUX : CAS DE BOULBI DANS LA PROVINCE DU KADIOGO AU BURKINA FASO* »

Numero	Nom commercial	Type de pesticide	Classe OMS	Famille chimique	Substance active
1	ADWURA WURA	<i>Herbicide</i>	III	PHOSPHONOGLYCINE	GLYPHOSATE 360G/L
2	ADOPA WURA	<i>Herbicide</i>	III	PHOSPHONOGLYCINE	GLYPHOSATE 360G/L
3	ALLIGATOR 400 EC	<i>Herbicide</i>	III	DINITROANILINE	PENDIMETHALINE 400G/L
4	BENAXONE SUPER	<i>Herbicide</i>	II	BIPYRIDYLIUM	PARAQUAT CHLORIDE 276G/L
5	BIBANA	<i>Herbicide</i>	II	PHOSPHONOGLYCINE	GLYPHOSATE 360G/L
6	DECIS 25 EC	<i>Insecticide</i>	II	PYRETHROID	DELTAMETHRINE 25G/L
7	EMACOT	<i>Insecticide</i>	II	AVERMECTINES	EMAMECTINE BENZOATE
8	GRAMOQUAT SUPER	<i>Herbicide</i>	II	BIPYRIDYLIUM	PARAQUAT CHLORIDE 276G/L
9	GRAMOSHARP SUPER	<i>Herbicide</i>	II	BIPYRIDYLIUM	PARAQUAT CHLORIDE 276G/L
10	GRAMODA SUPER	<i>Herbicide</i>	II	BIPYRIDYLIUM	PARAQUAT CHLORIDE 276G/L
11	GROWNSATE	<i>Herbicide</i>	III	PHOSPHONOGLYCINE	GLYPHOSATE 480G/L
12	GANORSATE	<i>Herbicide</i>	III	PHOSPHONOGLYCINE	GLYPHOSATE 480G/L
13	GRAMOKING 276 SL	<i>Herbicide</i>	III	BIPYRIDYLIUM	PARAQUAT CHLORIDE 276G/L
14	KAPAASE	<i>Insecticide</i>		AVERMECTINES; NEONICOTINOID	EMAMECTINE BENZOATE 20G/L; ABAMECTINE 20G/L; ACETAMIPRIDE 40G/L
15	PARAKIN 276 SL	<i>Herbicide</i>	II	BIPYRIDYLIUM	PARAQUAT CHLORIDE 276G/L
16	PYRICAL	<i>Insecticide</i>	II		CHLOPYRIPHOS-ETHYL
17	ROUNDUP 360 SL	<i>Herbicide</i>	III	PHOSPHONOGLYCINE	GLYPHOSATE 360G/L
18	SAMORY	<i>Herbicide</i>	III	SULFONYLUREA	BENSULFURON METHYL 100G/KG
19	SUNPHOSPHATE	<i>Herbicide</i>	IV	PHOSPHONOGLYCINE	GLYPHOSATE 750G/KG
20	TOROL	<i>Insecticide</i>		PYRETHROID	LAMBDAHALOTHHRINE 16G/L

ANNEXE I. FICHE D'ENQUETE

La fiche ci-dessous est l'ensemble des questions que nous avons administrés aux riziculteurs sur la plaine l'utilisation des pesticides et des engrais.

Date :

Fiche d'enquête

Nom :Prénom :Contact :

1. Quelles sont les spéculations que vous cultivez actuellement, les superficies et les rendements estimés ?

Spéculation	Superficie	Rendement	Période de Semis	Période de Récolte

2. Utilisez-vous des engrais ? quelles quantités par campagne ?

NPK :

.....

UREE :

.....

Fumure organique :

Autres (précisez)

3. Utilisez-vous des produit phytosanitaires (pesticides) ? si oui lesquels et la quantité par campagne

4. Depuis combien d'années exploitez-vous votre terrain ? :.....

5. Quels traitements réservez-vous aux emballages vides des produits phytosanitaires ?

Jeter :

Bruler :

Réutilisez :

6. Quelle est votre source d'approvisionnement en engrais et en pesticide ?

➤ **Engrais**

Boutique agréée :

marchand ambulant :

autres :

➤ **Pesticides**

Boutique agréée :

marchand ambulant :

autres :

7. Vous utilisez l'eau provenant des puits à quelle fin ?

Irrigation seulement :

consommation domestique :

autres :

8. Que pensez vous de l'utilisation des pesticides ? que recommandez-vous ?

.....
.....
.....

LEXIQUE

Les définitions sont tirées du dictionnaire français d'hydrogéologie de (CASTANY et AL, 1977), et des cours 2iE.

Aquifère : Domaine souterrain perméable et continu (hydrauliquement, eau pouvant aller partout) qui constitue un gisement d'eau souterrain.

Bassin versant : Zone géographique de collecte des eaux délimitée en amont par les lignes de partage des eaux ou lignes de crête, et en aval par l'exutoire.

Infiltration efficace : Quantité d'eau infiltrée depuis la surface du sol, qui traverse la zone non saturée et parvient effectivement à la zone saturée. C'est le flux d'infiltration qui traverse la surface libre d'une nappe, à distinguer de la hauteur d'infiltration (qui se réfère à la surface du sol).

Nappe d'eau souterraine : Ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

Niveau piézométrique : Niveau de la colonne d'eau qui équilibre la pression hydrostatique régnant au bas de la colonne.

Piézomètre : Puits d'observation dans lequel on peut mesurer le niveau de la nappe ou la charge piézométrique.

Recharge d'un aquifère : Syn. Alimentation, Apports d'eau externe de toutes origines, à un aquifère. Composante du bilan d'eau d'une nappe : somme des quantités d'eau apportées naturellement ou introduites artificiellement dans l'aquifère pendant une durée de référence.

Réserve Facilement Utilisable : Quantité d'eau qui doit être appliquée pour compenser l'eau utilisée par l'évapotranspiration de la plante en puisant dans le sol.

Réserve Utile : C'est la quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la plante. Elle est comprise entre deux limites de teneur en eau du sol : d'une part la capacité au champ (ou capacité de rétention) et d'autre part, le point de flétrissement.

Ruissellement : Ecoulement des eaux à la surface de la terre, notamment la surface des sols.

Surface piézométrique : Courbes d'égal niveau piézométrique représentant la mesure de niveau piézométrique dans plusieurs endroits d'une nappe.