

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES, TECHNOLOGIE ET
GÉOSCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POST GRADUATE SCHOOL OF
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

UNITÉ DE RECHERCHE EN GÉOSCIENCES ET APPLICATIONS
RESEARCH UNIT FOR GEOSCIENCES AND APPLICATIONS

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

***PIEZOMETRIE ET VULNERABILITE DES AQUIFERES DANS LA
COMMUNE DE MONATELE (CENTRE-CAMEROUN)***

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences de la Terre

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles

Option : Sol, Eau et Sciences Géotechniques

Rédigé et présenté par :

ASSE Raphael

Matricule : 15 E2255

Licencié-ès-sciences

Sous la Direction de :

Dr FEUMBA Roger

Chargé de Cours

Université de Yaoundé I



©Année académique 2023 -2024

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	i
DÉDICACES.....	iv
REMERCIEMENTS	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	viii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT	x
1.1. INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.2. Contexte de l'étude.....	1
CHAPITRE I : REVUE DOCUMENTAIRE.....	3
1.1. Revue documentaire	3
1.2. Piézométrie.....	3
1.3. Notion de vulnérabilité.....	3
CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES D'ÉTUDE.....	7
2.1. Présentation de la zone étudiée	7
2.1.1. Localisation géographique et administrative	7
2.1.2. Milieu naturel.....	8
2.1.3. Climat	8
2.1.3.1. Variation spatio-temporelle de la pluviométrie dans la commune de Monatélé.....	9
2.1.3.2. Température.....	9
2.1.3.3. Présentation du bilan hydrologique	10
2.1.4. Géomorphologie de la commune de Monatélé	12
2.1.3.1. Orographie de la zone d'étude.....	12
2.1.5. Réseau hydrographique	12
2.1.6. Géologie et sols.....	13
2.1.7. Végétation.....	15
2.2 Matériels utilisés	16
2.2. Méthodes d'étude	18
2.2.1. Évaluation des paramètres hydrodynamiques.....	18

2.2.1.1.	Le coefficient de perméabilité à travers l'analyse granulométrique.....	18
2.2.1.2.	Le coefficient de perméabilité à travers l'essai d'infiltration Porchet (1931)	19
2.2.2.	Étude piézométrique.....	19
2.2.2.1.	Suivi piézométrique.	19
2.2.2.2.	Techniques de mesures.....	20
2.2.2.3.	Analyse et traitement des données.	21
2.2.2.4.	Analyse spatiale des niveaux piézométriques.....	21
2.2.3.	Étude de la vulnérabilité des nappes par la méthode DRASTIC	22
2.2.4.	Limites méthodologiques.....	23
2.2.5.	Présentation de la méthode DRASTIC	24
2.2.6.	Évaluation des paramètres de vulnérabilité par la méthode DRASTIC	26
2.2.6.1.	Elaboration de la carte des Profondeur des nappes (D).....	26
2.2.6.2.	Elaboration de la carte de Recharge (R)	26
2.2.6.3.	Elaboration de la carte de Lithologie de l'aquifère (A).....	28
2.2.6.4.	Elaboration de la carte des Types de sols (S)	28
2.2.6.5.	Elaboration de la carte Topographique (T)	29
2.2.6.6.	Elaboration de la carte Lithologie de la ZNS (I).....	29
2.2.6.7.	Elaboration de la carte de Conductivité (C).....	30
2.2.6.8.	Pondération des différents facteurs de la méthode DRASTIC	30
CHAPITRE III :	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION	32
3.1.	Présentation des résultats	32
3.1.1.	Piézométrie	33
3.1.1.1.	Carte piézométrique en période de crue.....	33
3.1.1.2.	Carte piézométrique en période d'étiage.....	34
3.1.2.	Propriétés hydrodynamiques.....	34
3.1.2.1.	Coefficient de perméabilité par la méthode granulométrique.....	34
3.1.2.2.	Estimation du coefficient de perméabilité par l'essai Porchet.....	35
3.1.2.3.	Présentations des classes des zones de vulnérabilité (DRASTIC)	41
3.1.3.	Carte de vulnérabilité DRASTIC	49
3.2.	Discussion des résultats	53
3.2.1.	Données hydrogéologiques.....	53
3.2.2.	Relation entre les données hydroclimatiques et piézométrique.....	53
3.2.3.	Carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC	53
CONCLUSION GÉNÉRALE	55
REFERENCES	56

ANNEXES	63
Annexe 1 : résultats des suivis piézométriques (valeurs maximales et minimales) effectué respectivement en septembre 2023 et en janvier 2024 sur 40 ouvrages hydrauliques dans la zone d'étude.	63
Annexe 2 : Cotes des paramètres pour le calcul de l'indice DRASTIC.....	64
Annexe 3 : Organigramme de Thornwaite.....	65
Annexe 4 : Notes des autorités administratives de la ville de Monatélé	66

DÉDICACES

À :

Feue ma mère

Mon père

Ma famille

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu Tout Puissant pour le souffle de vie et la protection divine dont il me comble sans cesse.

Ce travail a été possible avec la collaboration et l'encadrement des personnes auxquelles j'adresse vivement mes remerciements les plus distingués, il s'agit de :

- Mes encadreurs le professeur NDAM NGOUPAYOU Jules Remy et le Docteur FEUMBA Roger, Chargé de Cours à l'Université de Yaoundé I. hydrogéologue, expert en eau et assainissement pour leurs rigueurs dans le travail, leurs esprits très critiques et leurs soutiens qui m'ont permis de finaliser avec succès cette étude.
- À tous mes enseignants du Département des Sciences de la Terre en l'occurrence les professeurs : NDJIGUI Paul-Désiré, Chef de Département des Sciences de la Terre ; YONGUE FOUATEU Rose ; EKOMANE Émile ; ONANA Vincent ; GANNO Sylvestre ; NGOS III Simon ; MBIDA YEM Lionel ; YENE ATANGANA Quentin, METANG Victor ; Élisé SABABA ; TEMGA Jean-Pierre.
- Les Docteurs : NOMO NEGUE Emmanuel ; ANABA ONANA Achille Basile ; TEHNA Nathanaël pour tous les enseignements reçus.
- Mon papa ETOUNDI EKASSI Gallus à qui je ne saurais exprimer ma profonde gratitude.
- Ma très chère mère (paix à son âme), MPESSE Emilienne pour son amour pendant mon enfance.
- Ma tante, Mère, grand-mère ASSE Suzanne pour l'éducation inculquée et pour le financement de mes études.
- Mon grand-frère Simon-Pierre BIKELE pour avoir largement participé à ma scolarité.
- Mon frère et ma sœur OKALA MVONDO Désiré, NGUETOM Jeanne D'arc pour leur soutien.
- Ma fiancée et mon fils.
- Madame Blanche et son époux depuis ODZA pour les conseils et le soutien énorme.
- Monsieur le Maire de la commune de Monatélé Prosper Parfait MBASSI BESSALA pour les autorisations de recherche.
- Je n'oublie pas mes camarades de promotion plus particulièrement BIANDA Frédéric et NZERMENI Diane Cybèle pour le soutien.
- J'exprime enfin ma profonde reconnaissance à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce travail.
- Monsieur le Préfet de la commune de Monatélé : Simon KAMSI Patrick pour les autorisations de recherche.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Illustration des paramètres DRASTIC (source : GSC, 2009). -----	4
Figure 2: Carte de localisation de la zone d'étude (PND, 2015) -----	7
Figure 3 : Variation de précipitations mensuelles (mm) -----	9
Figure 4:Variation des Températures mensuelles (°C). -----	9
Figure 5 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) obtenu partir des données météorologiques de la commune de Monatélé. -----	10
Figure 6: Graphique montrant les périodes de recharge et de vidange de la nappe souterraine dans la zone d'étude. -----	32
Figure 7 : Carte Hydrographie de la Commune de Monatélé (SRTM Cameroun, 2014) -----	13
Figure 8 : Géologie et sols de la commune de Monatélé (à partir de la Carte géologique du Cameroun à 1/1000000). -----	15
Figure 9 : Aperçu de la végétation de la zone d'étude -----	16
Figure 10: Carte des unités géomorphologiques de la Commune de Monatélé (OSM/USGS Earth Explorer / BBbike) -----	12
Figure 11 : Matériels utilisés pour les campagnes de terrain -----	18
Figure 12 : Observation de quelques puits -----	20
Figure 13 : illustration de mesures du niveau piézométrique : A) sonde piézométrique ; B) prise des coordonnées géographique des ouvrages et C) Mesure du niveau statique des puits. -----	21
Figure 14 : Carte de distribution spatiale des ouvrages dans la zone d'étude -----	22
Figure 15 : Schéma méthodologique -----	23
Figure 16: Carte piézométrie en période de crue -----	34
Figure 17 : Carte piézométrique en période d'étiage -----	34
Figure 18 : courbe granulométrique des échantillons de la ZNS et de la ZS -----	35
Figure 19 : Carte de répartition des profondeurs. (Facteur D) -----	42
Figure 20 : carte de recharge (Facteur R) -----	43
Figure 21 : Carte de répartition des aquifères (Facteur A) -----	44
Figure 22 : carte du type de sol (Facteur S) -----	45
Figure 23 : carte de pente (Facteur T) -----	46
Figure 24 : carte de perméabilité (Facteur I) -----	47
Figure 25 : Carte de conductivité (Facteur C) -----	49
Figure 26 : graphique de Répartition des classes de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC -----	50
Figure 27 : Carte de vulnérabilité DRASTIC -----	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques caractéristiques du bassin versant	8
Tableau 2 : Données climatiques moyennes mensuelles de la localité de Monatéle (1990- 2020), d'après la station du Cameroun. HSM-SIEREM 2010.	8
Tableau 3 : élément du bilan hydrogéologique (année mensuelle 1990-2020) calculée par la méthode de Thornthwaite	11
Tableau 4 : Bilan hydrologique de la Commune de Monatéle (1990-2020)	32
Tableau 5 : Facteur de pondération des différents paramètres de la méthode DRASTIC	25
Tableau 6 : Propriété de chaque paramètre et poids affectés	25
Tableau 7 : Classification du paramètre D (Aller et al., 1987).	26
Tableau 8 : Classification du paramètre R (Aller et al., 1987).	28
Tableau 9 : Classification du paramètre A (Aller et al., 1987)	28
Tableau 10 : Classification du paramètre S (Aller et al., 1987)	28
Tableau 11 : Classification du paramètre T	29
Tableau 12 : Classification du paramètre I (Aller et al., 1987)	29
Tableau 13 : Classification du paramètre C (Aller et al., 1987).	30
Tableau 14 : composition textural de la ZS et ZNS	34
Tableau 15 : Paramètres hydrodynamiques de la ZNS et la ZS.	35
Tableau 16 : Essai d'infiltration Porchet au point PB1	36
Tableau 17 : Essai d'infiltration Porchet au point PB 02	37
Tableau 18 : Essai d'infiltration Porchet au point PB03	37
Tableau 19 : Essai d'infiltration Porchet au point PB04	38
Tableau 20 : Essai d'infiltration Porchet au point PB05	39
Tableau 21 : Coefficients de perméabilités de chaque essai de la ZNS.	41
Tableau 22 : paramètre D	41
Tableau 23 : Matrice de confusion	42
Tableau 24 : Classe des poids et superficie de recharge nette	43
Tableau 25 : répartition des propriétés des différents aquifères	44
Tableau 26 : Pourcentage des sols	45
Tableau 27 : indice des pentes	46
Tableau 28 : paramètre de la zone non saturée	47
Tableau 29 : paramètre de perméabilité	48
Tableau 30 : Classification de la perméabilité selon DRASTIC	48
Tableau 31 : proportion DRASTIC (classe de vulnérabilité par zone).	49

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACF	Action Contre la Faim
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
CAMWATER	Cameroon Water Utilities Corporation
CRU	Climat Research Unit
GIRE	Gestion Intégrée des Ressource en Eau
GPS	Global Positioning System
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MINMIDT	Ministère des Mines, de l'Industrie et du Développement Technologique
OMD	Objectif Millénaire pour le Développement
OMS	Organisation Mondial de la Santé
ONU	Organisation des Nations unies
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
SIG	Système d'information Géographique
SMD	Sommet Mondial sur le Développement
SMDD	Sommet Mondial sur le Développement Durable
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'Enfance
WHO	World Health Organization

RÉSUMÉ

La commune de Monatélé, située dans le département de la Lekié (centre Cameroun) située entre le 4°10'- 4°18' de latitude Nord et 11°45'- 11°65' de longitude Est. Les eaux souterraines jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable de la commune, ainsi que dans l'irrigation agricole pour la subsistance des populations locales. Toutefois, seul près de 60% ont accès à l'eau potable soit 31 350 personnes sont desservies sur 52 076 habitants. Cette problématique suscite plusieurs interrogations : Comment localiser les zones sensibles à la pollution ? De quelle manière assurer une exploitation et une gestion durables des eaux souterraines dans cette localité ? Pour parvenir à cet objectif, plusieurs étapes ont été suivies. Pour ce faire, dans un premier temps, l'on a évalué les propriétés hydrodynamiques à l'aide de la relation de Hazen. Par la suite, l'évaluation de la piézométrie et des zones de recharge ont été faite par l'analyse chroniques de niveaux piézométriques, par l'application du bilan hydrologique sur 30 ans. Enfin, l'on a procédé à l'évaluation de la vulnérabilité des nappes par combinaison des paramètres de la méthode indiquée (DRASTIC), ce qui a permis de cartographier les zones de vulnérabilité potentielle et de déterminer les zones de sensibilité élevé. Les résultats indiquent que le coefficient de perméabilité varie entre 10^{-6} et 10^{-4} m/s. Ces données sont cohérentes, suggérant que la conductivité hydraulique des aquifères de socle est une conséquence des processus d'altération. Concernant les propriétés hydrodynamiques, une corrélation linéaire positive d'environ 80% a été obtenue entre les perméabilités et la lithologie de la zone. Les périodes de basses eaux et de hautes eaux varient selon les piézomètres et se situent respectivement en saison sèche et en saison pluvieuse pour la majorité des piézomètres. Aussi, Concernant la recharge, elle se fait directement au niveau des dépressions piézométriques. L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC a permis d'obtenir plusieurs cartes grâce aux sept paramètres, la superposition de ces différentes cartes a permis d'obtenir la carte de vulnérabilité de la zone d'étude. Ainsi l'on a pu recueillir les informations suivantes : Les vulnérabilités faibles et très faibles couvrent 70,8% de la zone d'étude ; 20,08% représentent les zones de vulnérabilité moyenne et enfin les zones de très forte vulnérabilité couvrent environs 9,12% de la zone d'étude. Au regard de ces résultats, il est recommandé de mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau impliquant toutes les parties prenantes locales ; développer et appliquer des politiques locales de protection des zones de recharge et des aquifères vulnérables.

Mots clés : Piézométrie, méthode DRASTIC, vulnérabilité, propriétés hydrodynamiques, Monatélé - (Centre Cameroun).

ABSTRACT

The commune of Monatélé, located in the department of Lekié (central Cameroon) located between 4°10'- 4°18' north latitude and 11°45'- 11°65' east longitude, is characterized by a humid equatorial climate with four seasons, which strongly influences the local hydrogeological formations. Groundwater plays a crucial role in the supply of drinking water to the commune, as well as in agricultural irrigation for the subsistence of the local population. However, only nearly 60% have access to drinking water, i.e. 31,350 people are served out of 52,076 inhabitants. This issue raises several questions: How to locate areas sensitive to pollution? How can we ensure the sustainable exploitation and management of groundwater in this locality? Providing answers to these questions requires above all a good understanding of the hydrogeological and hydrodynamic functioning of basement aquifers, which are very heterogeneous. The objective of this work is to assess the vulnerability of aquifers using the DRASTIC method, in order to identify areas at risk and to propose recommendations for integrated water resources management. To achieve this goal, several steps have been taken. To do this, the hydrodynamic properties of the were first evaluated using the Hazen relation. Subsequently, the evaluation of the Piezometry and recharge zones was made by the chronic analysis of piezometric levels, by applying the 30-year water balance. Finally, the vulnerability assessment of the aquifers was carried out by combining the parameters of the indicated method (DRASTIC), which made it possible to map the areas of potential vulnerability and to determine the areas of high sensitivity. The results indicate that the permeability coefficient varies between 10^{-6} and 10^{-4} m/s. suggesting that the hydraulic conductivity of basement aquifers is a consequence of weathering processes. Regarding the hydrodynamic properties, a positive linear correlation of about 80% was obtained between the permeabilities and the lithology of the zone. The periods of low water and high water vary according to the piezometers and are respectively in the dry season and in the rainy season for the majority of piezometers. Also, as far as recharge is concerned, it is done directly at the level of the piezometric depressions. The vulnerability assessment by the DRASTIC method made it possible to obtain several maps thanks to the seven parameters, the superposition of these different maps made it possible to obtain the vulnerability map of the study area. The following information was collected: Low and very low vulnerabilities cover 70.8% of the study area; 20.08% represent areas of medium vulnerability and finally areas of very high vulnerability cover about 9.12% of the study area. In view of these results, it is recommended to implement integrated water resources management involving all local stakeholders; develop and implement local policies to protect vulnerable recharge areas and aquifers.

Keywords: Piezometry, DRASTIC method, vulnerability, hydrodynamic properties, Monatélé - (Centre Cameroun).

1.1.INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.2.Contexte de l'étude

L'attention portée à la pollution des eaux souterraines est un phénomène qui prend de l'ampleur de jour en jour. Les eaux souterraines constituent actuellement un enjeu économique et stratégique primordial. L'étude de la piézométrie et de la vulnérabilité des aquifères dans la localité de Monatéle, s'inscrit dans un contexte d'urbanisation croissante et de pression anthropique sur les ressources en eau. La méthode DRASTIC, développée par Aller et al. (1987), sera utilisée pour évaluer la sensibilité de l'aquifère à la contamination.

L'eau est une ressource essentielle pour la vie humaine, le développement économique et la durabilité environnementale. Cette étude se concentre sur la piézométrie et la vulnérabilité des aquifères de la région, en utilisant la méthode DRASTIC pour évaluer le risque de contamination et la durabilité de ces ressources vitales. En effet, comme le soulignait Klouss Toepfler directeur général du programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) 'l'eau est étroitement liée à la santé, l'agriculture, l'énergie et la biodiversité '. Sans progrès dans le domaine de l'eau, il sera difficile voire impossible d'atteindre les autres objectifs du Millénaire pour le développement. La gestion des ressources en eau nécessite un travail conjoint des eaux de surface et des nappes. Ces derniers interviennent de façon très importante dans l'alimentation des cours d'eau, dans la migration des éléments polluants et l'alimentation en eau potable (Kamagate, 2006, Larocque et Pharand, 2010). Les ressources en eau souterraine de socle dans la commune de Monatéle sont mal connues. Elles sont situées dans un contexte Hydrogéologique complexe (roches cristallines d'origine plutonique et métamorphique) ou l'évaluation de la réserve en eau disponible reste difficile compte tenu des mécanismes scientifiques mis en œuvre. Des mécanismes de fonctionnement des eaux souterraines requiert la connaissance de niveau piézométrique des nappes (Engalenc, 1978). La méthode la plus simple pour juger les effets de l'exploitation d'un aquifère est d'effectuer un suivi piézométrique. En effet, réaliser avec une fréquence, le contrôle de l'évolution piézométrique permet de vérifier le comportement de l'aquifère, les puits ou les ouvrages hydrauliques doivent être choisis en fonction de leur localisation et du système considéré. Dans la pratique, il est possible de commencer le suivi piézométrique sur un grand nombre d'ouvrage afin de pouvoir dresser une carte et d'identifier les zones vulnérables. Cependant, seuls les ouvrages jugés représentatif sont suivis (Sighomnou, 2004).

L'objectif principal de la présente étude est d'évaluer la vulnérabilité des aquifères de la zone étudiée en utilisant la méthode DRASTIC, afin d'identifier les zones à risque et de proposer des recommandations pour une gestion intégrée des ressources en eau. Par ailleurs, les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivantes :

- Évaluer les paramètres hydrodynamiques du système aquifères ;
- Cartographier les zones sensibles à la pollution.

En plus de l'introduction et la conclusion générale, le mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre porte sur le contexte et la revue de la littérature ;
- Le deuxième chapitre met en exergue les matériels et les méthodes d'étude ;
- Le troisième chapitre présente les résultats et la discussion.

CHAPITRE I : REVUE DOCUMENTAIRE

1.1. Revue documentaire

Avant d'aborder cette étude, il faut noter que plusieurs recherches ont déjà pris part dans la Commune de Monatélé notamment : les campagnes piézométriques, des études pétrographiques et structurales. Toutes ces études bien qu'ayant des investigations variées, elles ont apporté des informations essentielles. Les principaux résultats et conclusions associés à ces travaux sont résumés ci-après sous forme d'une synthèse en trois principaux aspects notamment :

1.2. Piézométrie

La perméabilité d'un sol est fonction de la granulométrie et du degré d'interconnexions entre les vides d'un réservoir (Castany, 1998). Un niveau riche en particules grenues sera d'autant plus perméable qu'un niveau riche en particules fines.

Les caractéristiques hydrométriques et piézométriques indiquent que l'aquifère présente par endroit des zones fortement hétérogènes. La distribution de l'écoulement montre l'influence possible des propriétés physiques et hydraulique des terrains en amont du puits sur les systèmes d'écoulements souterrains (Bon et al., 2016).

1.3. Notion de vulnérabilité

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines a été introduit par Margat à la fin des années 60 (Margat, 1968). Il se base sur le fait que les écosystèmes compris entre la surface terrestre et les aquifères protègent naturellement les eaux souterraines contre les pollutions d'origine humaine, animale ou naturelle. Partant de ce postulat, le terme de « vulnérabilité des eaux souterraines » est défini comme étant le contraire de « protection naturelle contre les pollutions ». Cette protection est possible grâce à différents mécanismes d'atténuation des pollutions qui peuvent se produire durant le parcours de la substance polluante dans le système. Ces mécanismes sont entre autres la dispersion, la filtration, la sédimentation, la dilution, l'absorption/désorption, la biodégradation, la volatilisation et la dégradation chimique (Vrba and Zaporozec, 1994 ; Ducommun., 2010). La notion de vulnérabilité est développée depuis quarante ans et ne possède pas de définition unique mais diffère selon la sensibilité des approches et des auteurs (Cazaux, 2007). Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Hamza et al., 2007).

La méthode DRASTIC développée par Aller en 1987 sous l'égide de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (USEPA), est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères, par systèmes paramétriques. Le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et est affecté d'une cotation numérique croissante, en fonction de son importance dans la vulnérabilité. L'on peut considérer sept paramètres à savoir : la profondeur du plan d'eau (D) ; la recharge efficace annuelle de l'aquifère (R) ; les types de

sol (S) ; la lithologie (T) ; l'impact de la zone vadose (I) ; et la conductivité hydraulique de l'aquifère (C), (Ewodo et al., 2015). Ainsi, la profondeur de l'aquifère est un facteur important dans l'étude de la vulnérabilité car toute réduction du polluant s'opère en relation avec la profondeur (*Figure 1*). Les aquifères géologiques cristallins sont contenus dans une variété de roches Ignées plutoniques et métamorphiques. (Tillement, 1972 ; Djeuda et al., 2001).

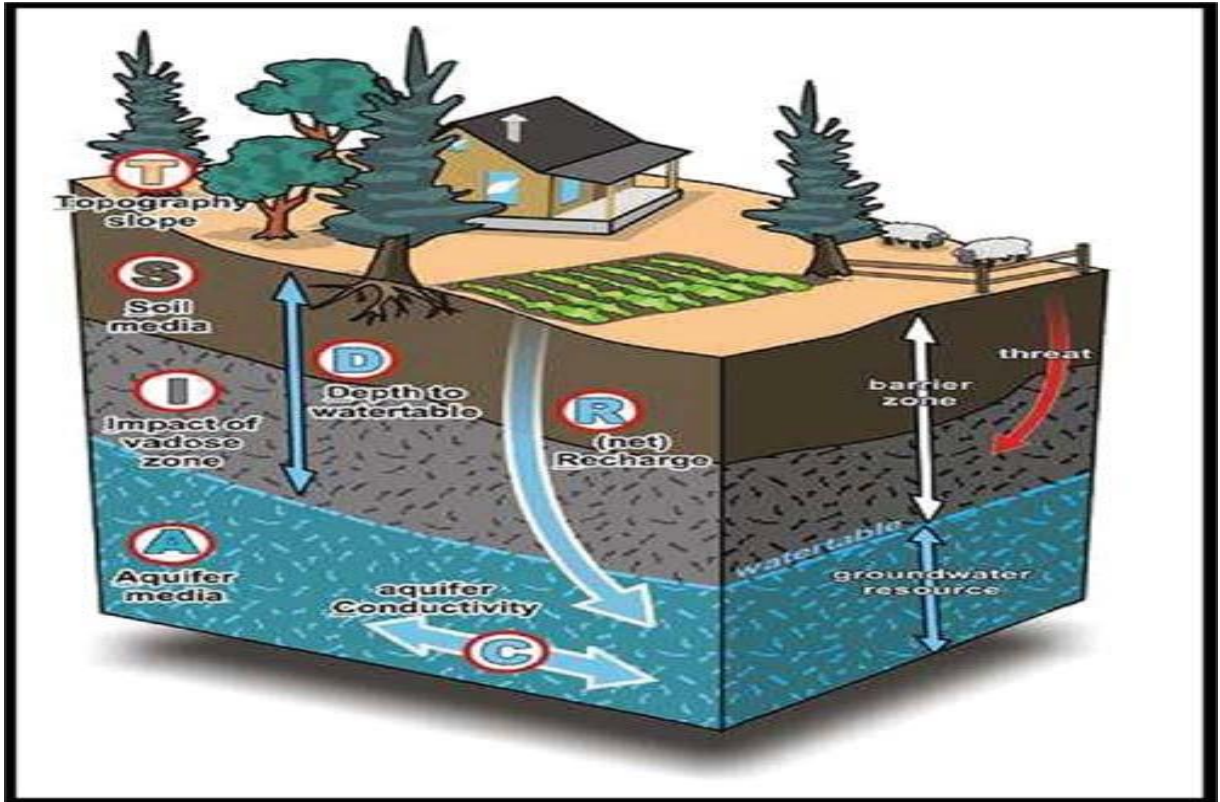


Figure 1: Illustration des paramètres DRASTIC (GSC, 2009).

Étant l'une des premières méthodes à avoir été mondialement utilisée, la méthode DRASTIC a fait l'objet de nombreuses adaptations en fonction de l'évolution des connaissances informatiques d'une part, et des particularités géographiques des régions étudiées, d'autres part, pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines (Thüler, 2014).

L'on distingue principalement trois classes de degré de vulnérabilité à savoir : vulnérabilité faible, moyenne ou modérée et forte ou importante la plus rencontrée de ces classes et la classe de vulnérabilité faible (Ewodo et al., 2015). En effet, l'étude de la vulnérabilité a pour but l'évaluation de la sensibilité des nappes phréatiques face à tout type de polluant introduit à partir de la surface du sol en se basant sur les propriétés physiques du milieu (Murat et al., 2003). Il est donc nécessaire que l'on puisse obtenir et traiter des données importantes de la zone d'étude située dans la commune de Monatéle pour que l'on puisse évaluer la vulnérabilité et de déterminer les cartes piézométriques de notre zone d'étude afin que nous puissions déterminer les zones sensibles à la population.

La vulnérabilité ne dépend que des seules conditions physiographiques et hydrogéologiques. Un aquifère peut être vulnérable, mais ne pas être atteint par la pollution à l'absence des pressions anthropiques (Temgoua et al., 2019).

L'eau peut être le véhicule d'un très grand nombre d'agents pathogènes rejetés dans le milieu extérieur par des actions humaines ou animales et peut ainsi être à l'origine de nombreuses maladies hydriques telles que : le cholera ; la diarrhée ; L'OMS quantifie à 4 milliards le nombre d'épisodes de diarrhée survenus dans le monde et qui est responsable de 3,1 millions de décès, dont la grande majorité des enfants de moins de cinq ans (OMS, 2008). Une épidémie de choléra en janvier 2011 a affecté 2052 personnes dans huit des dix régions du Cameroun et a fait environ 85 décès (Pana express, 2011). En 2018, on déclare de nouveau environ 45 cas décelés à l'Extrême Nord du pays (Unicef).

La qualité naturelle des eaux souterraines peut être altérée par l'activité humaine et inhérente au développement de ces activités. Les sources potentielles de pollution des eaux souterraines se sont multipliées au cours du temps (Added et Hamza, 1999 ; Renard, 2002 ; Danielopol et al., 2003 in Datry, 2003).

Les fortes teneurs en agents polluants proviennent indéniablement des excréments d'ordre ménagers et sont en relation avec le mode d'habitation (Feumba, 2015). En effet, selon se dernier, il existe un risque continu de pollution des ressources en eau souterraine à cause de la population. La croissance de la population, le développement des villes participent à une détérioration qualitative et quantitative des nappes phréatiques. L'eau souterraine dans les nappes phréatiques participent largement à l'approvisionnement en eau dans les ménages (Lener et al., 1999 ; Margat, 2006 ; Foster et al., 2010). Cependant, ces eaux font face à une contamination par des agents polluants anthropique (Travi et al., 1997 ; Boubacar, 2010). De même, dans nos villes et villages les puits et les sources peuvent être contaminés par des agents fécales de l'ordre de 280 000 UFC/100 ml (Tabué et al., 2013). Les aquifères sont une source importante pour l'approvisionnement en eau des populations (Ewodo et al., 2015).

L'eau est puisée dans les forages, les puits, les sources et même les cours d'eau, laquelle eau n'est malheureusement pas toujours assurée en termes de qualité (Temgoua et al., 2009). La question liée à la pollution des ressources en eaux est couramment abordée par la méthode DRASTIC.

Au cours des dernières décennies, de nombreuses techniques ont été développées pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines, notamment les méthodes d'indexation, de notation, hybrides, statistiques et de simulation (Voudouris, 2009). La méthode DRASTIC a été la plus couramment utilisée pour cartographier la vulnérabilité des aquifères poreux (Aller et al., 1987).

Conclusion partielle

Le domaine climatique correspondant est de type : tropical humide réparti sur tout le cycle annuel (02 saisons). Les sols de la localité de Monatélé sont ferrallitiques ou hydromorphes, tous couverts par une forêt dense. La localité appartient au bassin de la Sanaga et le réseau hydrographique est dense et de

type dendritique. La morphologie du secteur présente deux sous unités morphologiques et sa géologie comprend des granitoïdes, gneiss migmatites, micaschistes, paragneiss ainsi que des gneiss, amphibolites. Ces roches, sont recouvertes par des matériaux alluvionnaires tels que les argiles, sables. La méthode DRASTIC peut être applicable dans un tel contexte nonobstant quelques limites.

CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES D'ÉTUDE

2.1. Présentation de la zone étudiée

2.1.1. Localisation géographique et administrative

La zone étudiée est située dans la Région du Centre, Département de la Lékié, Arrondissement de Monatéle entre les coordonnées 04°08'30'' et 04°19'30'' de latitude Nord et 11°07'30'' et 11°22'30'' de longitude Est. Elle se limite au Nord par l'Arrondissement d'Ebebda, au Nord-est par celui de Sa'a, à l'Est par Obala, au Sud-ouest par Evodoula et le Département du Nyong-Ekélé, à l'Ouest par le fleuve Sanaga.

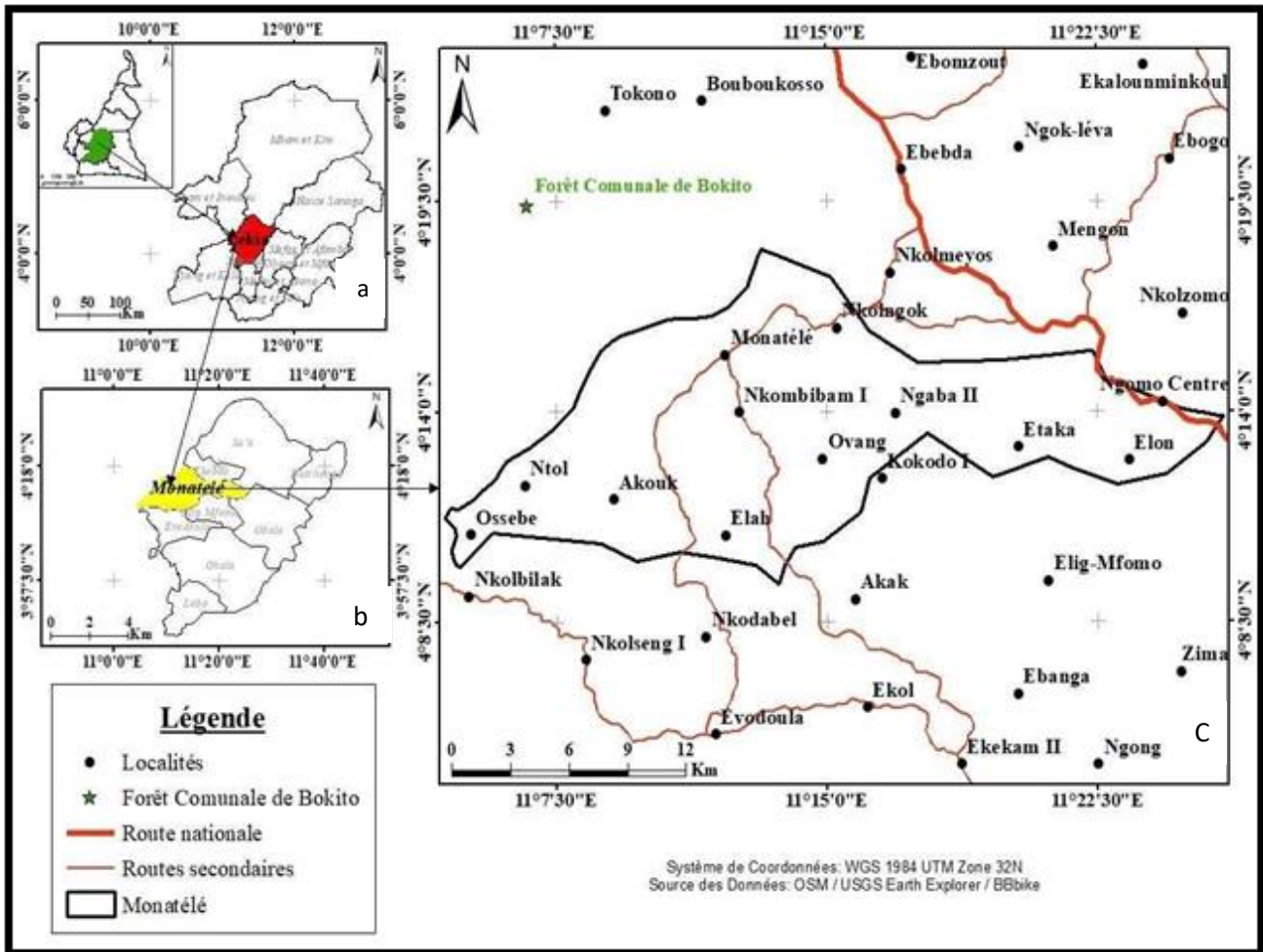


Figure 2: Carte de localisation de la zone d'étude (PND, 2015)

Les caractéristiques du bassin versant représentatif de la zone étudiée sont présentées dans le **Tableau I**).

Tableau 1 : Quelques caractéristiques de la zone d' étude

Caractéristiques de la zone d'étude	Coordonnée GPS	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Indice de compacité de Gravelus kg	Altitude max (m)	Indice de pente (%)
	4°10'-4°18' lat. 11°45'-11°65' long.	2,45	8,32 Km	1,48	460	3,6 %

2.1.2. Milieu naturel

2.1.3. Climat

Le climat qui affecte la zone d'étude est de type tropical humide ou équatorial à deux saisons réparties ainsi qu'il suit :

- Une saison sèche qui va de décembre à février ;
- Une saison de pluies qui va de mars à octobre.

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussien (1957) obtenu à partir des données météorologiques de la localité de Monatélé et ses environs, sur une période de trente ans (1990-2020) illustre cette répartition (**Figure 3**). Ce diagramme montre qu'Octobre est le mois le plus pluvieux (309,2 mm) et Janvier est le mois le plus sec (13,67 mm). La valeur plus élevée des températures est obtenue au mois de Février (27,01 °C) et la valeur plus basse, au mois d'Août (23,97 °C). Les précipitations sont abondantes, favorisant une végétation luxuriante.

Tableau 2 : Données climatiques moyennes mensuelles de la localité de Monatélé (1990- 2020), d'après la station du Cameroun. HSM-SIEREM 2010.

Mois	Ja	F	M	A	M	J	JU	A	S	O	N	D	Mo y	Tot.
													An n	Ann
P (mm)	13, 7	32, 3	129, 1	166	204	159, 8	104, 3	187, 3	272, 4	309, 2	101, 3	16, 4	/	1695,7 9
T (°C)	26, 2	27	26,7	26, 2	25, 7	24,9	24,2	24	24,4	24,6	25,4	25, 2	25,4	/

2.1.3.1. Variation spatio-temporelle de la pluviométrie dans la commune de Monatéle

La commune de Monatéle est soumise à un climat tropical avec des précipitations abondantes et des variations saisonnières marquées. Les précipitations jouent un rôle crucial dans la dynamique hydrologique et écologie de la région.

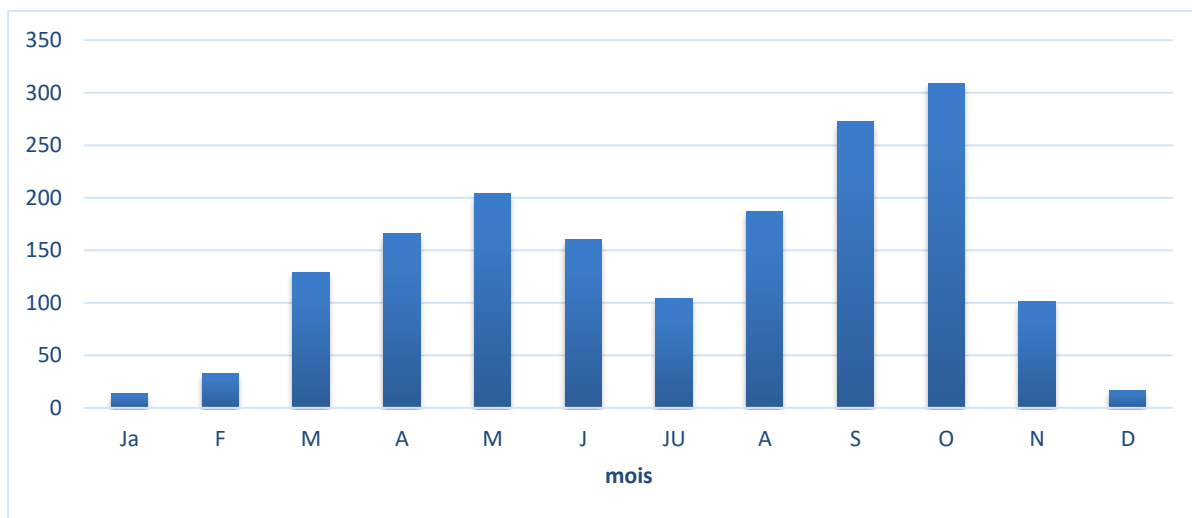


Figure 3 : Variation de précipitations mensuelles (mm)

L'étude des précipitations annuelle démontre que la Commune de Monatéle est caractérisée par deux saisons principales de forte pluviométrie : aout-octobre ; avril-juin.

2.1.3.2. Température

Les variations de température sont principalement influencées par les saisons sèches humides. La saison sèche qui s'étend de novembre à février est également plus chaude, tandis que la saison des pluies, de mars à octobre, tend à être plus fraîche en raison de la couverture nuageuse et des précipitations fréquentes (Figure 4).

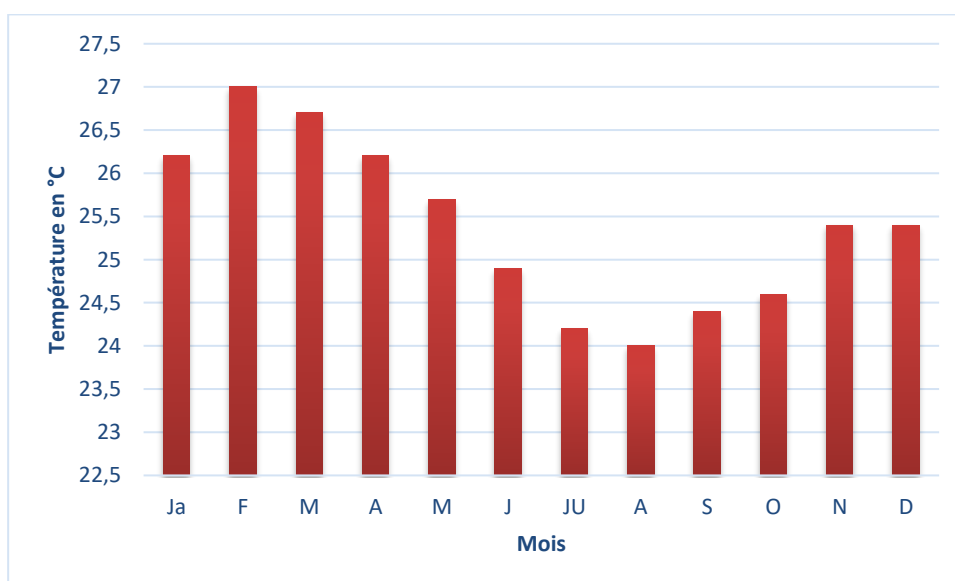


Figure 4: Variation des Températures mensuelles (°C).

L'étude de la variation moyenne mensuelle de la température présente les mois de janvier et décembre comme les mois avec des températures les plus élevées et le mois d'août comme étant le mois ayant la température la plus basse d'après le diagramme de Bagnouls et Gausson (1957) (**Figure 5**).

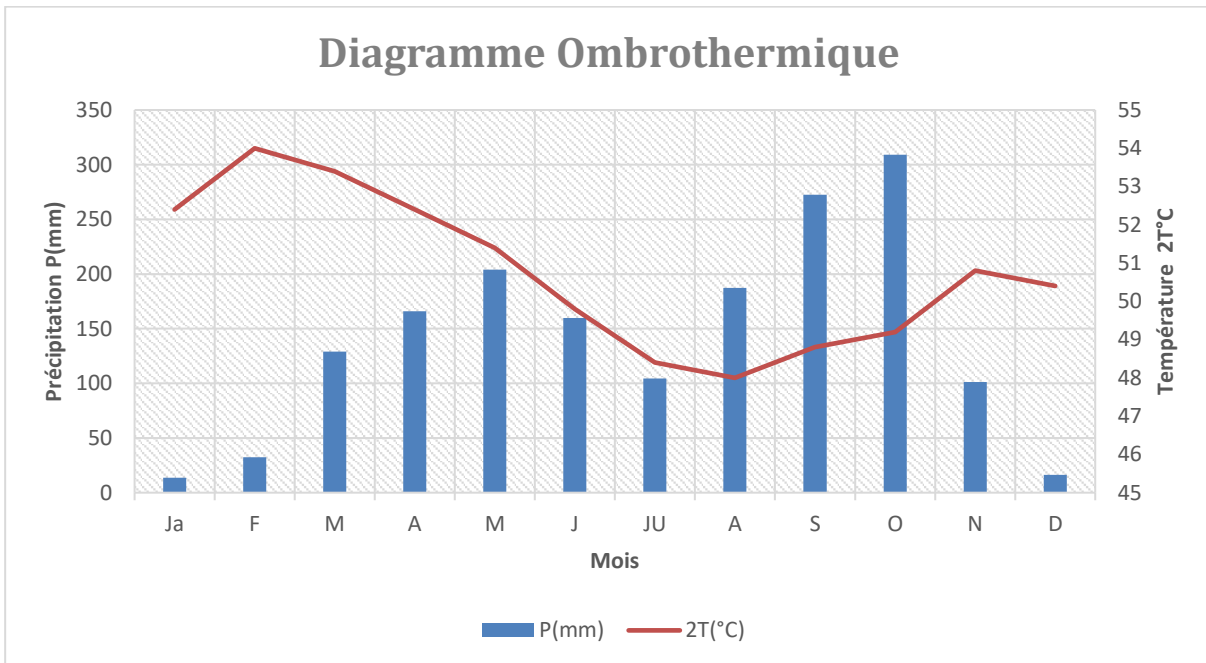


Figure 5 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) obtenu à partir des données météorologiques de la commune de Monatéle.

2.1.3.3. Présentation du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique a été réalisé selon la méthode de Thornthwaite (1954). Les termes du bilan hydrologique pour chaque mois sont présentés dans les **Tableau 3 & 3** et **Figure 15**.

Tableau 3 : élément du bilan hydrogéologique (année mensuelle 1990-2020) calculée par la méthode de Thornthwaite

Mois	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DÉCE	JAN	FÉV	TOTAL
ETP (mm)	125,74	114,48	110,82	97,72	91,99	89,56	91,82	96,71	103,74	104,40	118,58	117,79	1263,34
P (mm)	129,17	166,04	204,00	159,86	104,39	187,34	272,48	309,26	101,39	16,45	13,67	32,32	1696,38
T (°C)	26,70	26,16	25,65	24,87	24,17	23,97	24,39	24,56	25,35	25,17	26,21	27,01	25,35
F(λ)	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	0,94	
I	12,64	12,25	11,89	11,35	10,87	10,73	11,01	11,13	11,68	11,55	12,28	12,86	140,24
ETR (mm)	125,74	114,48	110,82	97,72	91,99	89,56	91,82	96,71	103,74	114,11	13,67	32,32	1082,67
DE (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-9,70	104,91	85,47	180,67
Lep (mm)	3,44	51,56	93,18	62,15	12,40	97,78	180,66	212,55	-2,35	-97,65	0,00	0,00	613,71
Ri	3,44	55,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,65	0,00	0,00	0,00	
±DRi	3,44	51,56	45,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,35	-97,65	0,00	0,00	0
S	0,00	0,00	24,09	43,12	27,76	62,77	121,71	167,13	83,57	41,78	20,89	10,45	
Hr (%)	2,73	45,04	84,09	63,60	13,48	109,18	196,75	219,77	-2,26	-84,24	-88,47	-72,56	

comme Nyarmang, Mekolo, Ndoup, Doua (**Figure 7**). Cependant, La Sanaga est le fleuve le plus long du Cameroun (918Km). Elle arrose la ville de Monatélé Le régime hydrographique est dense et permanent. Les principaux cours d'eau sont : la Lékié, la Ngobo, La Mbgaba. Cependant, il existe des cours d'eau moins important tels que : Mekolo, Ngarmang, Ndoup, Doua etc. et appartient au bassin versant de la Sanaga.

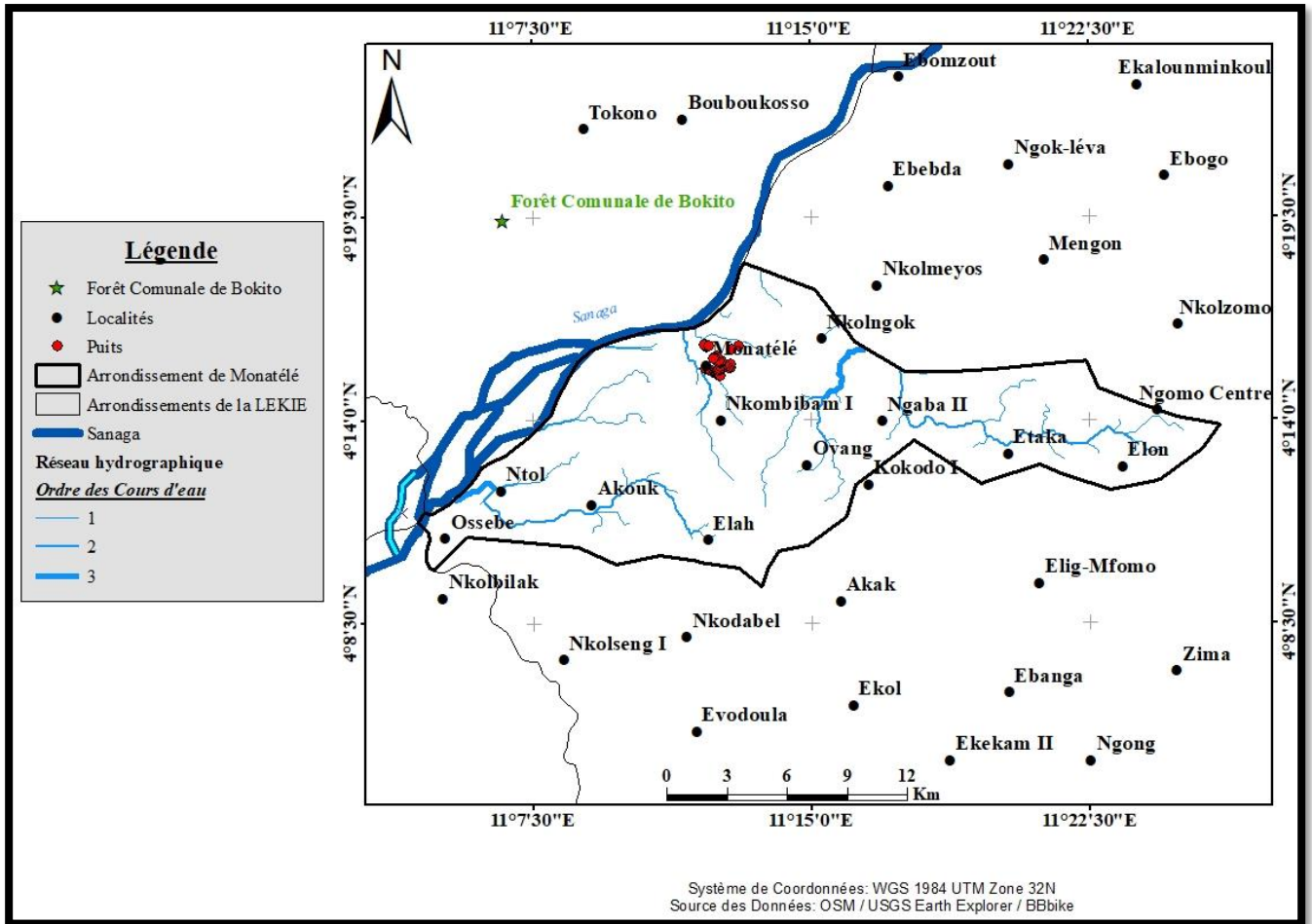


Figure 7 : Carte Hydrographique de la Commune de Monatélé (SRTM Cameroun, 2014)

2.1.6. Géologie et sols.

Les sols du Sud-Cameroun sont constitués de deux principaux types : les sols ferrallitiques rouges ou jaunes en amont des versants, les sols sableux argileux jaunâtres ou sols hydromorphes au niveau des bas-fonds et peu évolués sur les reliefs montagneux (Nyeck, 1988 ; Bilong et al., 1992). Dans la zone d'étude, l'altération des roches conduit à la formation des sols ferrallitiques rouges, jaunes et hydromorphes. On distingue particulièrement les roches ci- après : les granitoïdes alcalins (syénites) ; les gneiss migmatiques. (Monzo) granitique ; les quartzites interstratifiés ; les paragneiss (micaschistes) ; les gneiss amphibolitiques ultrabasitiques. Les résultats des analyses chimiques et minéralogiques montrent que les sols échantillonnés sont composés de quartz, kaolinite, hématite, muscovite, calcite, rutile, pyroxène, montmorillonite et illite, dans des proportions variables. La teneur en eau de ces sols

varie de 10,32 à 26,35 %. L'analyse granulométrique révèle des proportions dominantes d'argile allant de 32,8 à 53,7 % (Yannick et al., 2022).

Le substratum géologique est constitué de roches métamorphiques (gneiss, migmatites) d'âge précambrien (Nzenti et Tchoua, 1996). Les faciès rencontrés sont principalement des gneiss à grenat et plagioclases, des gneiss à grenat et à disthène, les pyriclites, les pyribolites et les pyroxénites à magnétite. Sur ces roches se développent les sols ferrallitiques et hydromorphes (Ekodeck, 1984 ; Ekodeck et Kamgang-Kabeyéné, 2002).

La zone d'étude appartient à la chaîne panafricaine de la zone mobile d'Afrique centrale (Nzenti, 1998). Les formations géologiques rencontrées sont essentiellement métamorphiques tels que des micaschistes, quartzites et des gneiss variées (Ngnotué et al., 2000, 2012 ; Li et al 2017). Elles sont d'âge Paleoprotérozoïque à Néoprotérozoïque et panafricain, compris entre 2,1 Ga et 500 Ma. Les études géologiques de ces formations métamorphiques ont montré qu'elles sont issues d'un métamorphisme cratonique (Tchakounté et al., 2017).

La géologie locale de la zone d'étude et ses environs, sont constitués de granitoïdes, gneiss migmatites, micaschistes, para gneiss ainsi que des gneiss amphibolites (Figure 8). A ces roches, sont recouvertes par des matériaux alluvionnaires tels que les argiles, sables (PRECASEM, 2021).

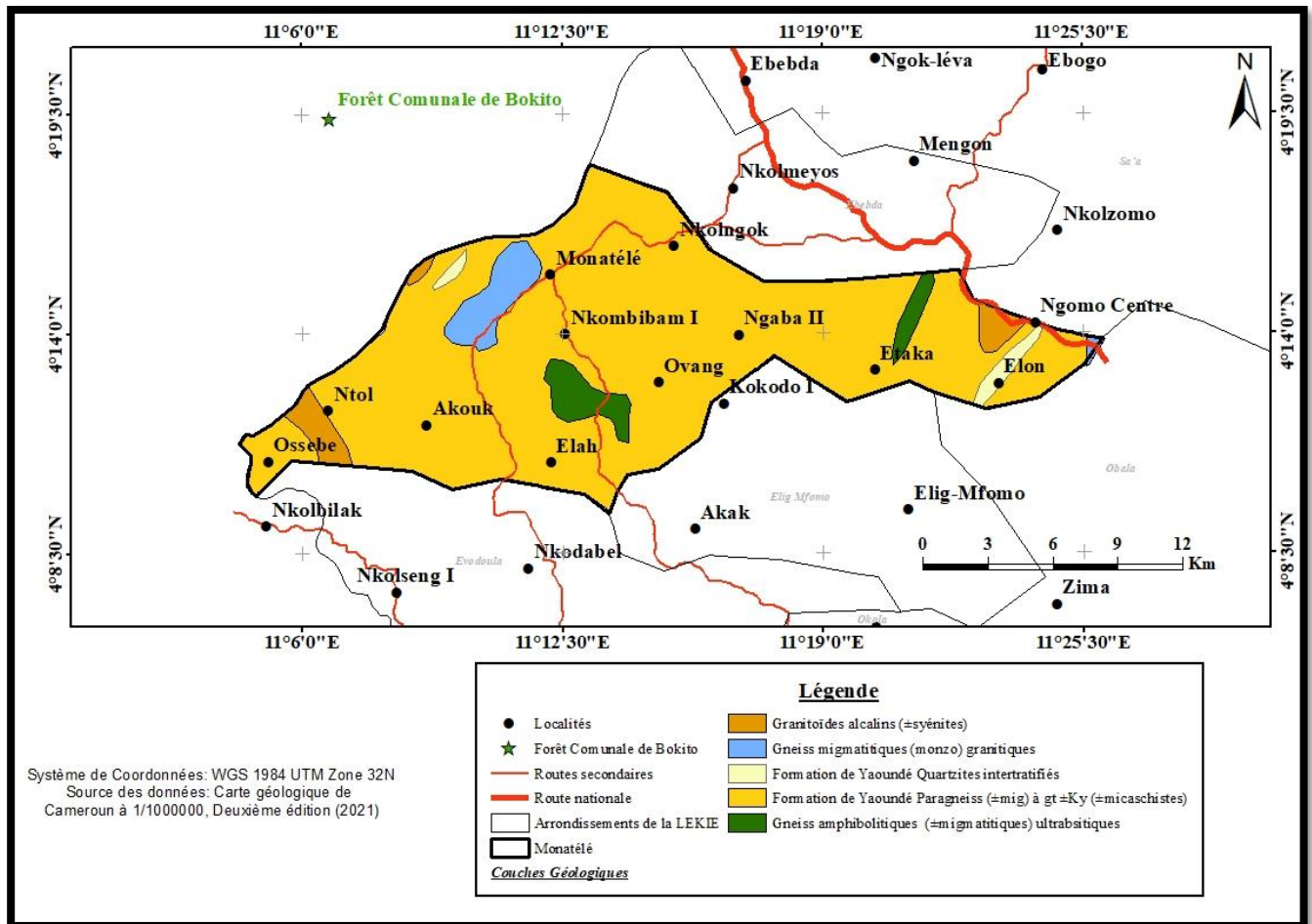


Figure 8 : Géologie et sols de la commune de Monatéle (à partir de la Carte géologique du Cameroun à 1/1000000).

2.1.7. Végétation

La végétation de la zone étudiée est une forêt équatoriale dégradée par la surexploitation des sols pour les activités pastorales (PCD, 2015). L'exploitation anarchique des essences précieuses est due à la forte poussée démographique et au besoin des populations en matériaux de construction (Figure 9).



Figure 9 : Aperçu de la végétation de la zone d'étude

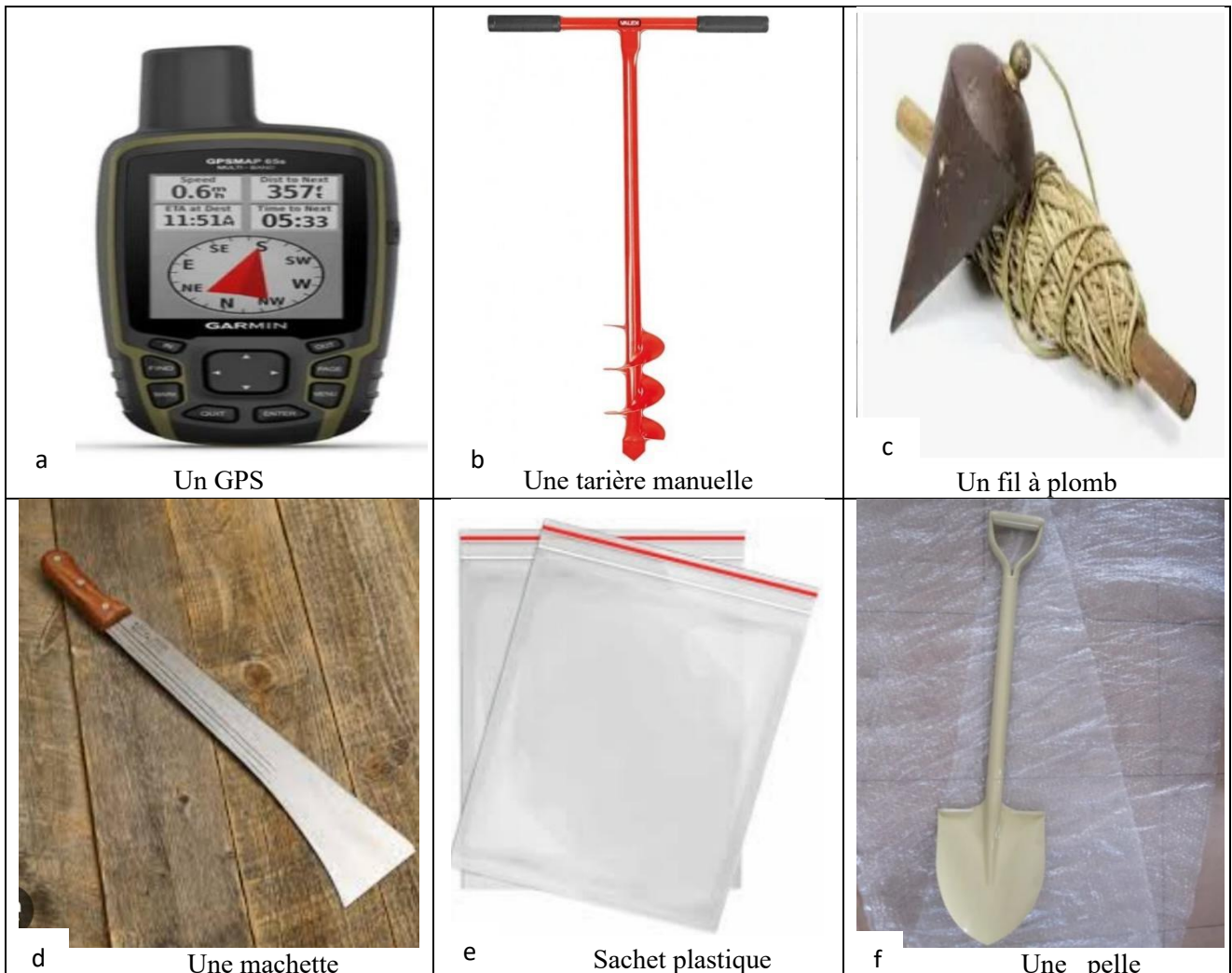
2.2 Matériels utilisés

Les matériels utilisés tant sur le terrain qu'en laboratoire pour atteindre les objectifs de ce travail sont les suivants :

- Une carte topographique de la ville de Monatéle à l'échelle 1/5 000 pour la délimitation et la caractérisation de la zone d'étude ;
- Un récepteur Global positioning system (GPS) de type Garmin 12X pour le géoréférencement des points d'eau prélevés (figure a);
- Une tarière manuelle pour le carottage des sols (figure b) ;
- Une sonde piézométrique de 100 m de long à double signalisation (sonore et lumineux) pour mesurer les différents niveaux statiques des ouvrages suivis (figure h) ;
- Un ordinateur portable sous Windows 10 qui est le support de tous les logiciels utilisés (figure i) ;
- Une images SRTM de la scène acquise le 2 Avril 2024. Son exploitation a abouti à la cartographie des linéaments ;
- Les logiciels utilisés (Ms Excel 2016, Ms Word 2016, ArcGIS 9.3, Surfer 13 et ENVI) respectivement pour le traitement des données et la construction des graphes, la production de texte, la

réalisation des cartes thématiques numériques, la schématisation des profils d'altérations et le traitement des images satellitaires ;

- Un fil à plomb couplé à un double décimètre pour la mesure du diamètre et de la profondeur des points d'eau (figure c) ;
- Les sacs plastiques pour la conservation des échantillons de sol prélevés (figure e) ;
- Un téléphone portable pour la prise de vue ;
- Les colonnes de tamis de mailles carrées et une balance électronique très sensible, respectivement pour l'analyse granulométrie et la pesée des échantillons de sols récoltés ;
- Un chronomètre pour mesurer la descente de l'eau dans les trous lors des essais Porchet (1931) (figure g) ;
- Une machette pour désherber les sites de prospection (figure d) ;
- Une pelle pour rafraîchir les profils d'altérations afin de mieux les décrire (figure f).



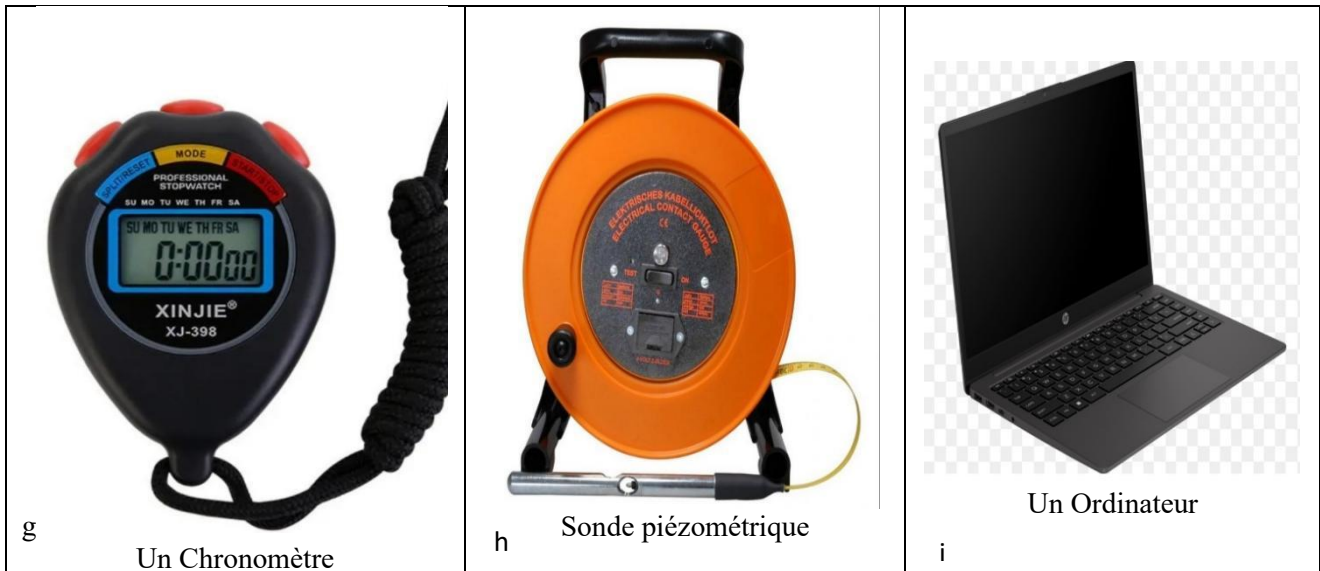


Figure 10 : Matériels utilisés pour les campagnes de terrain

2.2. Méthodes d'étude

2.2.1. Évaluation des paramètres hydrodynamiques

Les propriétés hydrodynamiques permettent de quantifier le flux d'eau et d'étudier leur circulation dans le sol. Les principales propriétés comme le coefficient d'emmagasinement (S) et la transmissivité (T) peuvent être calculé par les essais de pompage. Le coefficient de perméabilité (K) peut être estimé par l'analyse granulométrie et les essais d'infiltrations de Porchet. La porosité efficace (n_e) des aquifères s'estiment grâce aux formules algébriques de la mécanique des sols.

2.2.1.1. Le coefficient de perméabilité à travers l'analyse granulométrique.

Il faut déterminer la distribution pondérale de la taille des particules de sols en utilisant l'analyse granulométrique. L'on a prélevé deux échantillons représentatifs des matériaux à analyser, un échantillon pour la ZS et un autre pour la ZNS. Ces échantillons sont séchés à l'étuve à 105°C pendant 24h pour déterminer l'humidité relative (Hr) et surtout éviter toute altération des résultats. L'on a ajouté une solution d'eau de javel pour neutraliser les matières organiques.

Les échantillons agités sont mis dans les allongés gorgé d'eau à 1000 ml et à l'aide d'une pipette graduée, l'on a effectué trois prélèvements de 20 ml chacun aux instants $t=46s$, $t=286s$ et $t=8h$ pour déterminer respectivement la masse des particules fines, des particules moyennes et les particules grossières. Le reste de la solution présente dans les allonges est lavé puis sécher à étuve à 105°C pour déterminer la masse de la fraction sableuse. À partir des masses de chaque fraction, l'on construit la courbe granulométrique qui montre une relation entre le pourcentage cumulé de chaque fraction minéralogique en fonction de la taille des grains.

De cette courbe granulométrique, l'on a calculé les paramètres suivants :

- Le diamètre efficace des grains (d_{10}) qui correspond à la taille des particules ayant un pourcentage cumulé inférieur à 10%) ;

- Le coefficient d'uniformité (U) permet d'avoir une idée sur la granularité avoir, il se calcule par la relation suivante $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$;

- Les coefficients de perméabilité (K) sont calculés par la relation empirique de Hazen (1895) suivante $k = c \cdot d_{10}^2$ où C désigne un coefficient qui dépend du matériau, il varie entre 48 pour les sables argileux et 142 pour les sables.

Pour évaluer la porosité de la ZS et de la ZNS, l'on a utilisé un pycnomètre pour mesurer la masse volumique des échantillons (ρ) à 25°C.

À partir de la formule empirique suivante nous avons évaluer la porosité de ces zones :

$$Ne = \frac{m_e}{\rho_e} * \frac{\rho}{m} = \frac{1}{d} \cdot \frac{m_e}{m}$$

m_e : La masse de l'eau nécessaire pour saturer le matériau

m : la masse humide de l'échantillon prélevé sur le terrain

ρ_e : la masse volumique de l'eau

d : densité apparente de l'échantillons

2.2.1.2. Le coefficient de perméabilité à travers l'essai d'infiltration Porchet (1931)

Les tests d'infiltrations de Porchet permettent d'évaluer la vitesse de circulation de l'eau dans le sol. Le principe consiste à creuser un trou de rayon (R) dans le sol à l'aide d'une tarière manuelle, ensuite saturer le trou d'eau jusqu'à un niveau initial déterminé.

Mésuser le niveau initial d'eau dans le sol et noter régulièrement les variations de niveau d'eau (h) dans le trou au fil du temps, autrement dit le taux d'infiltration (K) en fonction des variations de niveau d'eau et du temps écoulé. La perméabilité s'obtient en traçant la courbe $\log\left(h + \frac{R}{2}\right) = f(t)$, une fois le régime stabilisé on obtient une droite de pente $p = -\frac{2 \cdot K}{2,3 \cdot R}$.

2.2.2. Étude piézométrique

La piézométrie est la mesure de la profondeur de la surface nappe d'eau souterraine. Elle est exprimée soit par rapport au sol en mètre, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer. L'établissement d'une bonne carte piézométrique est lié principalement à la qualité des mesures altimétriques des piézomètres.

2.2.2.1. Suivi piézométrique.

L'on a sélectionné des piézomètres (puits, sources et forages) pour notre étude. Les données utilisées pour cette étude ont été acquises aux cours de deux campagnes de terrain : en septembre 2023 pendant la saison pluvieuse (pluviométrie maximale) et en janvier 2024 pendant la saison sèche (pluviométrie minimale). La **Figure 11** est une représentation spatiale de la distribution des piézomètres sur la zone d'étude.



Figure 11 : Observation de quelques puits

2.2.2.2. Techniques de mesures.

Afin de collecter les données, nous avons réalisé des mesures quotidiennes entre 7h et 10h pendant une période de six mois. La méthode utilisée repose sur l'emploi d'une sonde piézométrique équipée d'un capteur sensible à la conductivité ionique de l'eau. Le paramètre étudié est le niveau statique (NS), qui correspond à la profondeur du niveau d'eau par rapport au terrain naturel.

L'on a utilisé un récepteur GPS de type Garmin 12X ; une sonde piézométrique pour mesurer les coordonnées géographiques de chaque piézomètre (*Figure 11 et 13*).



Figure 12 : illustration de mesures du niveau piézométrique : A) sonde piézométrique ; B) prise des coordonnées géographiques des ouvrages et C) Mesure du niveau statique des puits.

2.2.2.3. Analyse et traitement des données.

Les niveaux piézométriques (NP) ont été calculés à partir des niveaux statiques suivant l'équation suivante à l'aide du logiciel Excel : $Np = Z - Ns$.

NP (m) : niveau piézométrique.

Z (m) : altitude du terrain naturel.

Ns (m) : niveau statique.

2.2.2.4. Analyse spatiale des niveaux piézométriques.

Les échantillons d'eau collectés en septembre 2023 et en janvier 2024 ont fait l'objet d'une analyse spatiale afin de réaliser respectivement la carte piézométrique maximale et minimale. Les mesures de profondeur d'eau ont été effectuées sur 44 puits traditionnels, qui servent également piézomètres (puits d'observation). Ces mesures ont été rapportées à une référence altimétrique pour obtenir les cotes piézométriques, qui constituent la base de la représentation cartographique de notre carte piézométrique (**Figure 13**).

Les données recueillies ont été traitées à partir des logiciels ARCGIS ; Surfer 7.0 respectivement pour la réalisation des cartes piézométriques de la zone d'étude.

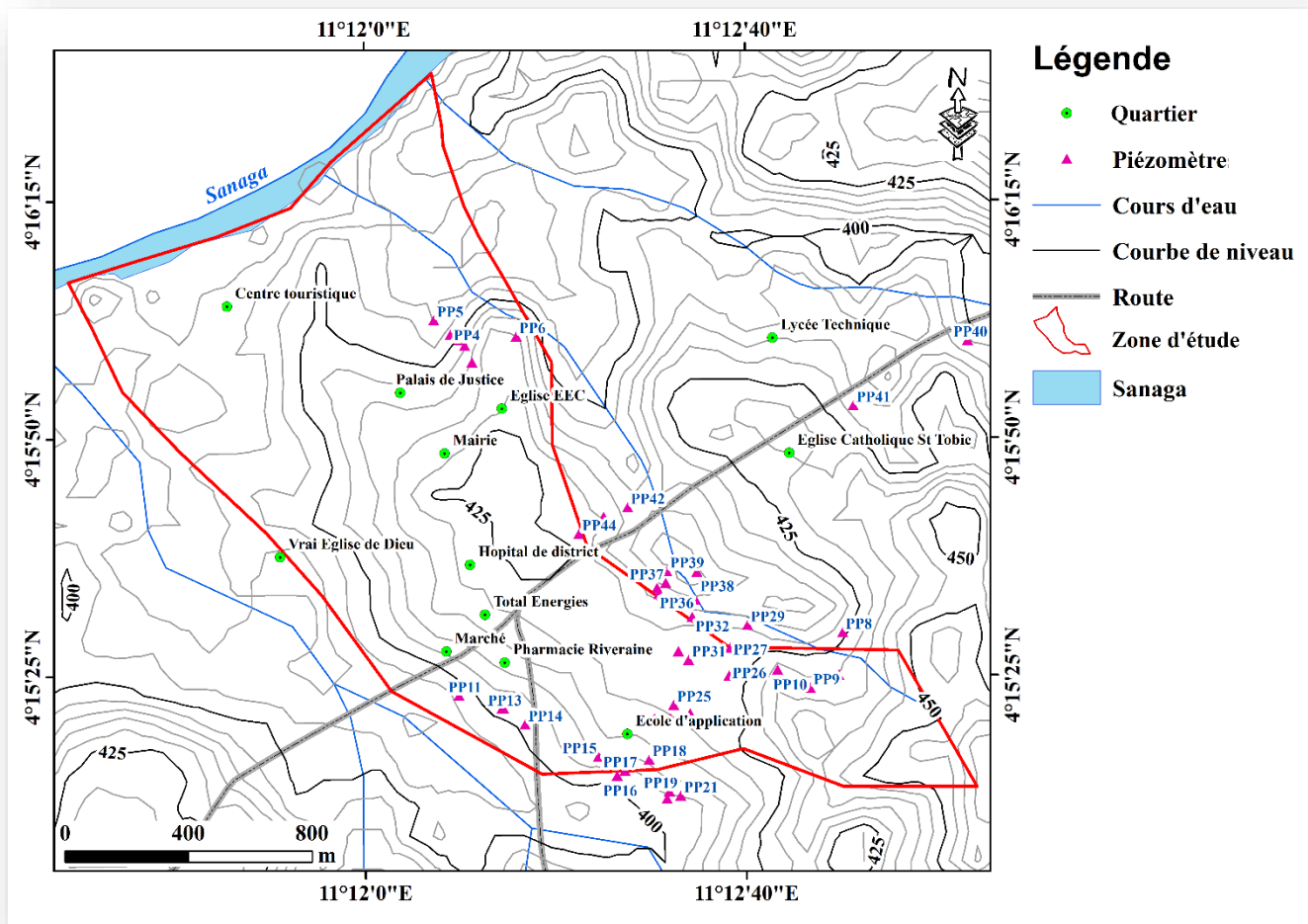


Figure 13 : Carte de distribution spatiale des ouvrages dans la zone d'étude

2.2.3. Étude de la vulnérabilité des nappes par la méthode DRASTIC

La constitution de la base de données, le prétraitement des données et des images satellites, la cartographie des différents paramètres contrôlant la vulnérabilité et enfin la combinaison des différents résultats ont permis de ressortir la carte de vulnérabilité.

Plusieurs facteurs déterminent le degré de vulnérabilité intrinsèque de la qualité des ressources en eau à savoir : les facteurs relativement stables dans le temps, le sol, la géologie, l'hydrogéologie, et le relief (la pente ou la topographie) et les facteurs variant d'une année à l'autre, la pluviosité, le couvert du sol (type d'occupation du sol), et certaines activités et pratiques anthropiques constituent ainsi les principaux facteurs externes qui modifie (protège ou aggrave) l'action des facteurs internes. La figure (figure 15), présente le schéma méthodologique qui a été adopté pour cette étude, et qui a permis de structurer notre démarche de recherche.

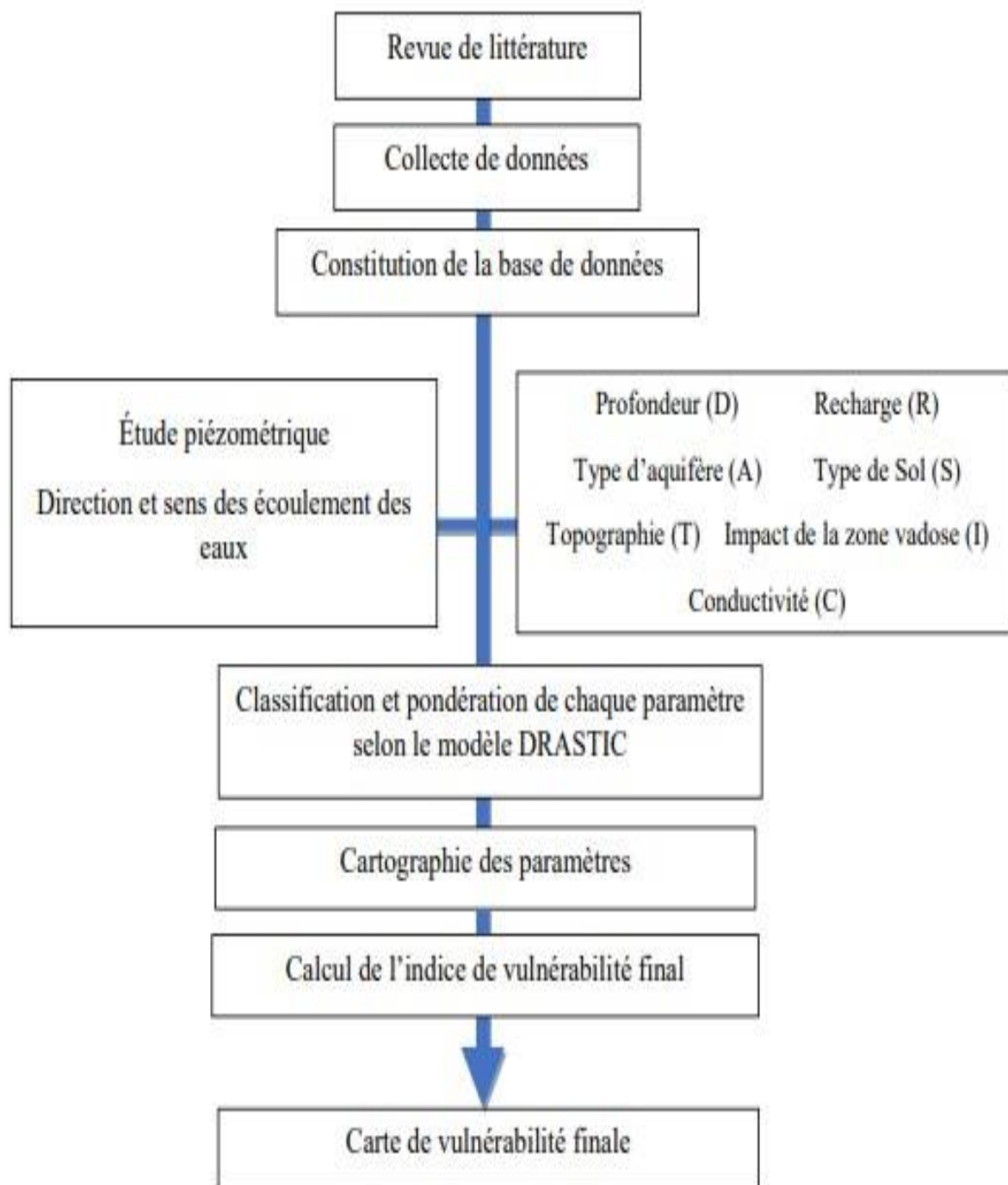


Figure 14 : Schéma méthodologique

2.2.4. Limites méthodologiques

La mise en place de la méthodologie pour la cartographie des zones potentielles de vulnérabilités dans la zone d'étude, s'est faite en plusieurs étapes et a fait face à plusieurs difficultés :

- **Données d'entrée et mise à jour des Données :** La méthode DRASTIC repose fortement sur la qualité et la précision des données d'entrée (profondeur de la nappe, recharge nette, aquifère, sol ; topographie, impact de la zone vadose, conductivité hydraulique). Toute inexactitude peut entraîner des erreurs dans l'évaluation de la vulnérabilité. De même, les changements dans l'utilisation des terres et

les pratiques agricoles peuvent modifier la vulnérabilité au fil du temps, nécessitant des mises à jour régulières des données pour des évaluations précises

- **Échelle d'étude et subjectivité :** L'application de la méthode DRASTIC à une échelle locale peut ne pas capter toutes les variations spatiales fines, réduisant ainsi la précision de l'évaluation. Par ailleurs, le système de pondération et de notation DRASTIC comporte une certaine subjectivité, ce qui peut affecter la comparabilité des résultats entre différentes études.
- **Facteur non pris en compte :** la méthode DRASTIC ne prend pas en compte certains facteurs spécifiques à des zones particulières, comme les activités industrielles ou agricoles locales, qui peuvent influencer la vulnérabilité des eaux.
- **Hypothèses simplificatrices :** la méthode DRASTIC repose sur l'hypothèse que les sources de contamination sont uniquement superficielles, ce qui peut ne pas refléter la réalité des contaminations souterraines.
- **Évaluation qualitative :** La méthode DRASTIC fournit une évaluation quantitative de la vulnérabilité, mais ne considère pas les aspects qualitatifs de la gestion des ressources en eau ; tels que l'impact des pratiques agricoles ou industrielles.

Bien que la méthode DRASTIC soit un outil utile pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines, elle présente des limites qui doivent être prises en compte lors de son application. Les résultats obtenus pour la zone d'étude doivent être interprétés avec prudence et complétés par d'autres études spécifiques à la région pour une évaluation plus complète.

2.2.5. Présentation de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC, développée par les services de l'Agence américaine de protection de l'environnement USEPA (Aller *et al.*, 1987), est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque verticale à la pollution des aquifères par systèmes paramétriques ; le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et affecté d'une cotation numérique croissante en fonction de son importance dans la vulnérabilité. L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales des sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité. Les sept paramètres Drastic découpent, de façon schématique, une unité hydrogéologique locale en ses principales composantes, lesquelles influencent à différents degrés les processus de transport et d'atténuation des contaminants dans le sol, ainsi que leur temps de transport. Une valeur numérique appelée poids paramétrique, comprise entre 1 et 5, est attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence. Chaque paramètre est classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10. La plus petite cote représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination (**Tableau 4**). Une valeur numérique appelée indice de vulnérabilité DRASTIC et notée ID est déterminée : elle décrit le

degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

Tableau 4 : Facteur de pondération des différents paramètres de la méthode DRASTIC

Critères	Facteurs de pondération	
	NORMAL	PESTICIDES
D:Profondeur	5	5
R: Recharge	4	4
A:Milieu aquifère(zone Saturée)	3	3
S:Milieu sol en dessus de la zone non saturée	2	5
T:Topographie	1	3
I:Nature de la zone non saturée	5	4
C: Perméabilité de d'aquifère	3	2

D'après Aller et al. (1987)

Le **Tableau 5** résume les propriétés de chaque paramètre et le poids qui lui est affecté et qui traduit son influence dans la vulnérabilité.

Tableau 5 : Propriété de chaque paramètre et poids affectés (Aller et al.,1987)

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique.	5
R	Recharge nette	Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	4
A	Lithologie de d'aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le Piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la Granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	3
S	Sol	Est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.	2
T	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible,	1
I	Zone non Saturée	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La Percolation du polluant jusqu'à la surface Piézométrique est d'autant plus grande que Cette texture est favorable (graviers, sables grossiers ...)	5
C	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.	3

2.2.6. Évaluation des paramètres de vulnérabilité par la méthode DRASTIC

2.2.6.1. Elaboration de la carte des Profondeur des nappes (D)

La profondeur de la nappe est définie comme la distance verticale entre la surface du sol et la surface de la nappe phréatique dans un aquifère libre, plus la nappe est profonde, moins il ya de risque de contamination. Cette profondeur est obtenue à partir de relevés piézométriques. L'on a mesuré les distances entre la surface du sol et la nappe phréatique à l'aide d'une sonde piézométrique. Les valeurs sont ensuite classées en intervalles et affecté par des notes correspondantes définis suivant le **Tableau 6** (ex. : 0-10 m, 10-20 m).

Tableau 6 : Classification du paramètre D (Aller et al., 1987).

Classe de Profondeur (m)	Coefficient
0 – 1,5	10
1,5 – 4,5	9
4,5 - 9	7
9 - 15	5
15 - 23	3
23 - 30	2
> 30	1

2.2.6.2. Elaboration de la carte de Recharge (R)

La recharge représente la quantité d'eau qui a atteint les nappes après infiltration. Son calcul varie selon notre position dans la région (poreux, karstique, etc.). Dans ce cas, c'est la formule de Thornthwaite (1944) qui a été utilisée. Cette formule permet de faire La comparaison des entrées et des sorties d'eaux dans le système aquifère allant de la période de l'année 1990 à l'année 2020 est effectuée grâce à la méthode du bilan hydrologique. C'est-à-dire de résoudre l'équation suivante :

$$P = R + ETR + I \pm \Delta Q$$

P : précipitation (mm)

R : ruissèlement (mm)

ETR : Évapotranspiration réelle (mm)

I : Infiltration (mm)

ΔQ : variation de stock

Selon la méthode de Thornthwaite (1948) il faut affronter l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) et précipitation brute (P) correspondante pour calculer les termes du bilan hydrologique comme le témoigne l'organigramme (**voir annexe 3**).

Dans cette méthode, l'année hydrologique correspond au mois où les pluies commencent à tomber dans la zone étudiée et la réserve facilement utilisable par les plantes (RFU) est estimé à 100 mm. Les équations qui permettent d'estimer les termes du bilan sont les suivants :

$$\text{L'évapotranspiration potentielle } ETP = 16 \times \left(\frac{10T}{I}\right) \times F(\lambda)$$

Où i : indice mensuelle de température en °C $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$ et I : indice moyen annuel de température

$I = \sum i$, T : température moyenne en °C,

Avec $\alpha = 0,942 + 1,7 \times 10^{-2} \times I - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 6,75 \times 10^{-7} \times I^3$ et $F(\lambda)$ est une constante qui dépend du mois et de la topographie de la zone ;

- Le déficit d'écoulement DE (mm) = ETP - ETR ;
- La lame d'eau écoulée après la pluie LEP (mm) = P - ETR ;
- Le ruissèlement R (mm) = LEP - DE ;
- L'infiltration I (mm) = P - ETR - R ;
- L'humidité relative moyenne $H_r(\%) = \frac{P - ETP}{ETP} * 100$;
- l'écoulement $S = \frac{1}{2}(P - ETP + \Delta R_i - 1)$, il se calcule pour les mois où la réserve commence à se constituer ;
- La réserve du mois i (R_i) sera calculée en suivant l'organigramme.

D'autre part, L'utilisation des données du Climatic Research Unit (CRU) pour la spatialisation de la pluviométrie est une pratique courante dans le domaine de la climatologie et de la météorologie. Le CRU est un centre de recherche renommé qui collecte, analyse et archive Des données climatiques mondiales, y compris les précipitations. Les données du CRU sont disponibles sous forme de grilles spatiales avec une résolution temporelle et spatiale spécifique.

La carte d'occupation du sol a elle aussi été utilisée car elle conditionne elle aussi l'infiltration de l'eau dans le sol. Elle a été obtenue en faisant une classification supervisée des sols à partir des images Landsat téléchargés. En effet, les forêts peuvent avoir un coefficient plus élevé en raison de leur Capacité à intercepter l'eau de pluie, tandis que les zones urbaines peuvent avoir un coefficient plus faible en raison de l'imperméabilisation du sol. En combinant les données de précipitation et les coefficients de recharge attribués à chaque type d'occupation du sol, il est possible de calculer la recharge potentielle pour chaque zone. Cela peut être fait en multipliant la précipitation moyenne par le coefficient de recharge spécifique à chaque type d'occupation du sol.

$R_{nette} = f(P, OS)$ Où R = précipitation en (mm) et OS = Occupation du Sol.

Il s'agit de la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat, topographie et l'occupation du sol (**Tableau 7**).

Tableau 7 : Classification du paramètre R (Aller et al., 1987).

Recharge (mm)	Coefficient
0 - 50	1
50 - 100	3
100 - 140	6
140 - 180	8
> 180	10

2.2.6.3. Elaboration de la carte de Lithologie de l'aquifère (A)

Il s'agit de la nature du milieu géologique saturé qui constitue l'aquifère (sables, graviers, calcaires etc.). Plus le milieu est perméable et fracturé, plus la vulnérabilité est élevée. L'analyse des cartes géologiques existantes couplée aux observations de terrain ont permis de définir 02 types d'aquifères à savoir : les orthogneiss et les paragneiss. Les orthogneiss couvrent environ 82,95% de la zone d'étude, tandis que les paragneiss couvrent 17,05%. Les orthogneiss parcourent particulièrement la faille de la Sanaga, ce qui fait qu'elle soit plus favorable à la circulation des eaux en profondeur. Ce paramètre est obtenu en faisant des corrélations avec les bases de données mises à dispositions. La carte géologique du Cameroun 2021 (MINMIDT), la carte géologique du Cameroun 2008 (Toteu et al., 2008). Les données piézométriques et granulométriques collectées sur le terrain d'une part par la collecte des paramètres des différents piézomètres et d'autres part par des essais porchet ont été conjointement utilisées pour l'identification du type de formation en profondeur (**Tableau 8**).

Tableau 8 : Classification du paramètre A (Aller et al., 1987)

Classe	Coefficient
Graviers	10
Sables	9
Limons sableux	6
Limons	4
Limons silteux	3
Argiles	1

2.2.6.4. Elaboration de la carte des Types de sols (S)

C'est la nature de la partie supérieure de la zone non saturée, siège d'une activité biologique importante (**Tableau 9**). Les sols influencent l'infiltration et l'atténuation des contaminants. Les données pédologiques sont utilisées pour établir la carte des sols.

La carte des sols met en exergue 02 types de sol à savoir : les sols hydromorphes et les sols à sesquioxydes. Les sols hydromorphes ont la caractéristique d'avoir une couleur grisâtre due à l'accumulation de la matière organique et ont pour la plupart du temps une texture argileuse. Les sols à sesquioxydes ont une couleur rouge brun à cause de la présence de fer. Ils ont pour la plupart du temps une texture argileuse ou limoneuse.

Tableau 9 : Classification du paramètre S (Aller et al., 1987)

Classe	Coefficient
--------	-------------

Graviers	10
Sables	9
Limons sableux	6
Limons	4
Limons silteux	3
Argiles	1

2.2.6.5. Elaboration de la carte Topographique (T)

La topographie, exprimée en pourcentage de pente, influe sur le ruissèlement et l'infiltration. Plus la pente est faible plus le temps de contact entre l'eau et le sol est long, favorisant l'infiltration. La carte des pentes est obtenue à partir des données topographiques. La carte est en déterminant les pourcentages des pentes dans les différentes zones d'étude qui seront par la suite multiplié par une note T contenue dans le tableau de classification du paramètre T en fonction du pourcentage. Le **Tableau 10** illustre les notes attribuées à chaque pente.

Tableau 10 : Classification du paramètre T

Plage de la pente T en %	Note T
0 à 2	10
2 à 6	9
6 à 12	5
12 à 18	3
>18	1

2.2.6.6. Elaboration de la carte Lithologie de la ZNS (I)

C'est la nature du matériau de la zone vadose, situé entre la surface du sol et la nappe. C'est un paramètre clé qui contrôle l'atténuation des contaminants.

La zone non saturée (ZNS) représente cette fraction entre la nappe et la surface du sol où les pores sont partiellement saturés en eau. La perméabilité de cette zone contrôle grandement la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe. Ce paramètre a été obtenu à partir des données de surface à partir des essais porchet, des données pédologiques disponibles et des échantillons récoltés. L'étude des corrélations entre ses données ont permis de ressortir une carte de synthèse représentant la lithologie de la ZNS (**Tableau 11**).

Tableau 11 : Classification du paramètre I (Aller et al., 1987)

Classe	Coefficient
Calcaire	10
Basalte	9
Sable et gravier	8
Calcaire litée et shale	6
Shale	4
Limons silteux	3
Argiles	1

2.2.6.7. Elaboration de la carte de Conductivité (C)

La conductivité hydraulique désigne la capacité des formations géologiques à transmettre de l'eau. Elle contrôle elle aussi la migration des contaminants de la surface vers la nappe. La conductivité hydraulique est obtenue par affectation d'un coefficient de perméabilité pour chaque classe lithologique de la zone d'étude. Ce facteur est obtenu par interpolation IDW des données récoltées. Les essais au laboratoire sur les échantillons récoltés sur le terrain ont permis d'avoir une estimation de la valeur de la perméabilité de l'aquifère (**Tableau 12**).

Tableau 12 : Classification du paramètre C (Aller et al., 1987).

Classe (m/s)	Coefficient
$1,5*10^{-7} - 5*10^{-5}$	1
$5*10^{-5} - 15*10^{-5}$	2
$15*10^{-5} - 33*10^{-5}$	4
$33*10^{-5} - 5*10^{-4}$	6
$5*10^{-4} - 9*10^{-4}$	8
$> 9*10^{-4}$	10

2.2.6.8. Pondération des différents facteurs de la méthode DRASTIC

Chaque carte reclassifiée a été pondérée suivant le modèle DRASTIC. Les coefficients affectés à chacun des paramètres varient en fonction de leur contribution dans le transport des polluants de la surface jusqu'à la nappe. Ces coefficients sont des valeurs qui varient entre 1 et 10 ; et sont attribuées à chaque classe. Les valeurs de chaque classe sont inversement proportionnelles au temps de transfert des polluants vers la nappe. Un coefficient de 2 signifie une vulnérabilité faible, tandis que la vulnérabilité forte a un coefficient de 10.

Dans une seconde étape, les paramètres DRASTIC ont été pondérés par une valeur numérique allant de 1 à 5 et classés, l'un par rapport aux autres, selon leur importance dans le transfert des polluants de la surface du sol jusqu'à la nappe d'eau contenue dans notre zone d'étude. Cette valeur représente le poids des paramètres DRASTIC. Elle est proportionnelle aux possibilités de transfert des polluants vers la zone saturée.

Le poids le plus élevé (poids 5) est attribué aux deux paramètres les plus importants dans la protection intrinsèque de l'aquifère : la profondeur « D » et la lithologie de la zone non Saturée « I » qui contrôlent le transfert des polluants vers la nappe. Par conséquent, plus la profondeur de la nappe est faible et plus la zone non saturée est formée par des sols de plus en plus perméables (score tend vers 10), plus le temps écoulé par le polluant, pour rejoindre la nappe, est faible.

Le poids 4 est attribué à la Recharge « R » ou encore à l'intensité des pluies qui vient en second lieu dans ce travail. Ce paramètre est d'une si grande importance dans le transfert des polluants de la surface vers la nappe aquifère, puisqu'il joue le rôle moteur d'agent principal de transport. Plus l'intensité de la

pluie est forte et plus le coefficient d'infiltration « ou la recharge nette » est élevé, plus le transport des polluants vers la nappe aquifère est rapide.

La Conductivité hydraulique « C » et la Lithologie de l'Aquifère (nappe) « A » interviennent après l'arrivée du polluant à la nappe. Elles contrôlent l'écoulement souterrain et donc la propagation latérale des polluants. Ces deux paramètres ont été pondérés par un poids de valeur égale à 3.

Les caractéristiques minéralogiques du sol « S » contrôlent le mouvement descendant des contaminants. La taille et la minéralogie des grains de sol contrôlent la vitesse d'infiltration des substances polluantes déposées à la surface. Le poids de ce paramètre est égal à la valeur 2.

La pente Topographique « T » à la surface contrôle le degré d'infiltration des eaux de ruissellement, et donc des polluants, vers la nappe aquifère. Elle n'agit qu'en présence des précipitations, même s'il existe une source de pollution à la surface du sol. Le poids de ce paramètre est égal à la valeur 1 (poids le plus petit).

L'équation suivante a été implémentée pour obtenir l'indice de Vulnérabilité intrinsèque global de Monatéle :

$$VI = 5D + 4R + 3A + 2S + 1T + 5I + 3C$$

Avec VI : Vulnérabilité Intrinsèque

La méthode DRASTIC génère une carte de vulnérabilité avec des valeurs ou indices caractérisant le degré de pollution des nappes souterraines. Cet indice encore appelé indice de vulnérabilité comprend généralement des valeurs entre 23 et 226. Certains auteurs adoptent leur propre intervalle afin de caractériser la vulnérabilité en fonction de leur zone d'étude. Pour cela, la classification d'Aller et al. (1987) a été utilisé.

CHAPITRE III : PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1.Présentation des résultats

Bilan hydrologique

La carte d'occupation du sol a elle aussi été utilisée car elle conditionne elle aussi l'infiltration de l'eau dans le sol. Elle a été obtenue en faisant une classification supervisée des sols à partir des images Landsat téléchargés. En effet, les forêts peuvent avoir un coefficient plus élevé en raison de leur capacité à intercepter l'eau de pluie, tandis que les zones urbaines peuvent avoir un coefficient plus faible en raison de l'imperméabilisation du sol. En combinant les données de précipitation et les coefficients de recharge attribués à chaque type d'occupation du sol, il est possible de calculer la recharge potentielle pour chaque zone. Cela peut être fait en multipliant la précipitation moyenne par le coefficient de recharge spécifique à chaque type d'occupation du sol.

$$R_{nette} = f(P, OS)$$

Où R = précipitation en (mm) et OS = Occupation du Sol.

Tableau 13 : Bilan hydrologique de la Commune de Monatélé (1990-2020)

Termes du Bilan	Valeur Numerique (mm)	Proportion (%)
P	1696,38	100,00
E	1082,67	63,82
R	433,04	25,53
I	180,67	10,65
Total	1696,38	100

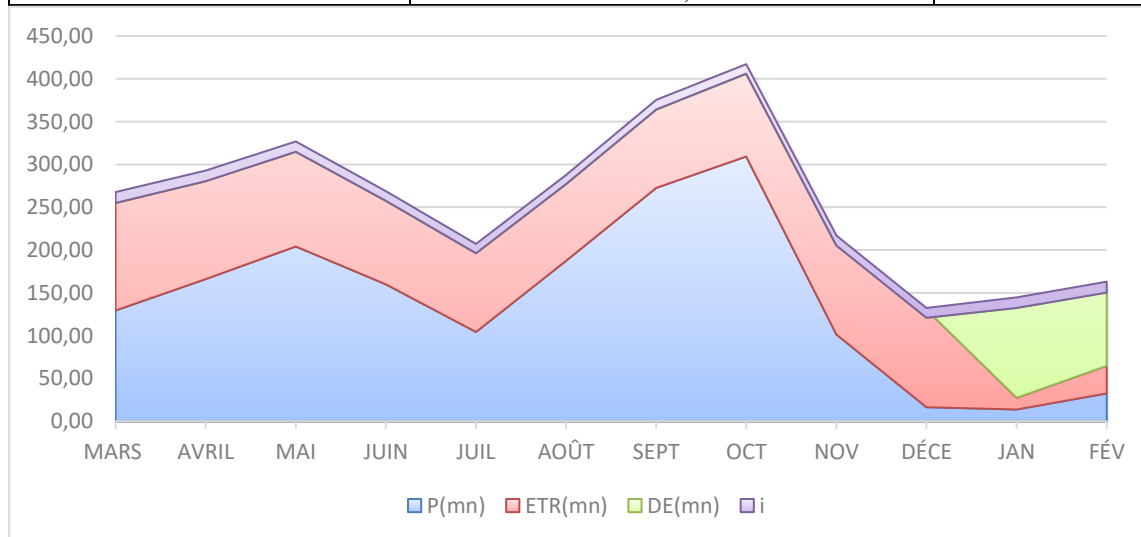


Figure 15: Graphique montrant les périodes de recharge et de vidange de la nappe souterraine dans la zone d'étude.

Dans cette étude, la quantité d'eau qui s'infiltré pour constituer la recharge est estimée à 181 mm soit 10,5% de la pluie annuelle. La recharge de la nappe phréatique commence dès le mois de mars, tandis que la vidange commence en Décembre. La quantité d'eau qui s'évapore sous forme de vapeur d'eau atmosphérique est estimée à 1082,67 mm soit 63,82% de la pluie annuelle. La quantité d'eau qui ruissèle pour se jeter dans les rivières est estimée 433 mm soit 25,5% de la pluie annuelle.

3.1.1. Piézométrie

La spatialisation des informations recueillies sur le terrain a permis de ressortir les informations sur le sens d'écoulements des eaux souterraines au sein de la zone d'étude. Les résultats présentent l'évolution spatiale du niveau de l'eau dans le sol. Les cartes du niveau piézométrie des hautes (crue) et basses (étiage) eaux de la nappe libre sont respectivement représentées par les figures 16 et 17.

3.1.1.1. Carte piézométrique en période de crue

La période de crue se situe en saison des pluies, car c'est à ce moment que les nappes se rechargent. Le niveau piézométrique varie entre 391,5 m et 430,85 m, avec une moyenne de 411,05 m. La répartition spatiale du niveau piézométrique à cette période permet d'identifier un dôme et plusieurs dépressions piézométriques. Ce dôme représente les zones où la nappe se recharge et se retrouve au Sud-Est de la zone d'étude. Les dépressions piézométriques représentent les zones de décharge de la nappe ; elles se retrouvent particulièrement vers le lycée technique et derrière l'Église EEC. Ces dépressions piézométriques peuvent être aussi de zone de décharge artificielle de la nappe (pompage). Les nappes se décharge aussi au niveau de certaine zone prêt de la Sanaga (**Figure 16**).

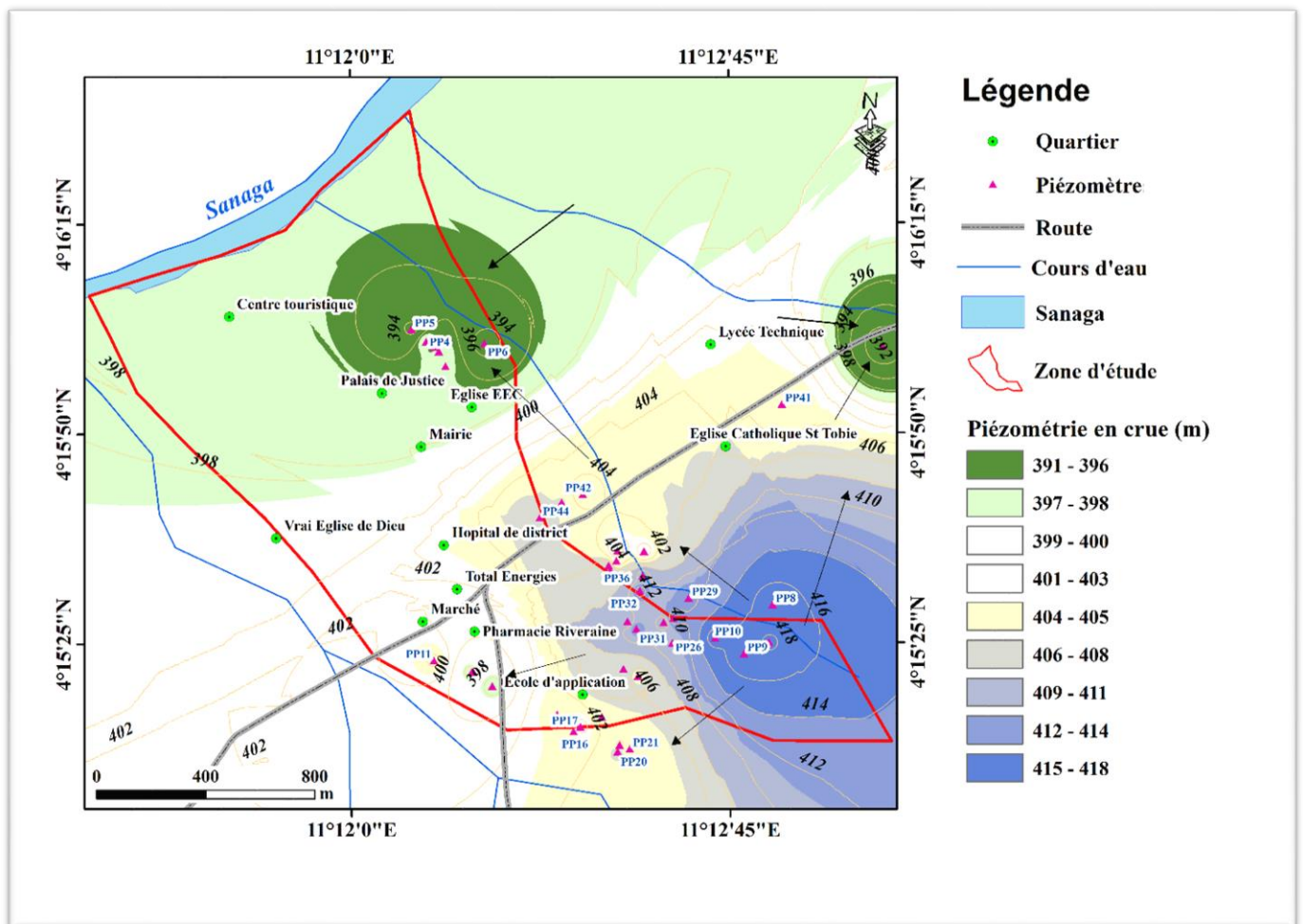


Figure 16: Carte piézométrie en période de crue

3.1.1.2. Carte piézométrique en période d'étiage

La répartition spatiale du niveau piézométrique en période d'étiage montre des variations allant de 391,1 m et 418,35m ; avec une moyenne à 404,95 m. les résultats obtenus montrent une structure et un sens d'écoulement similaire à la période de saison des pluies.

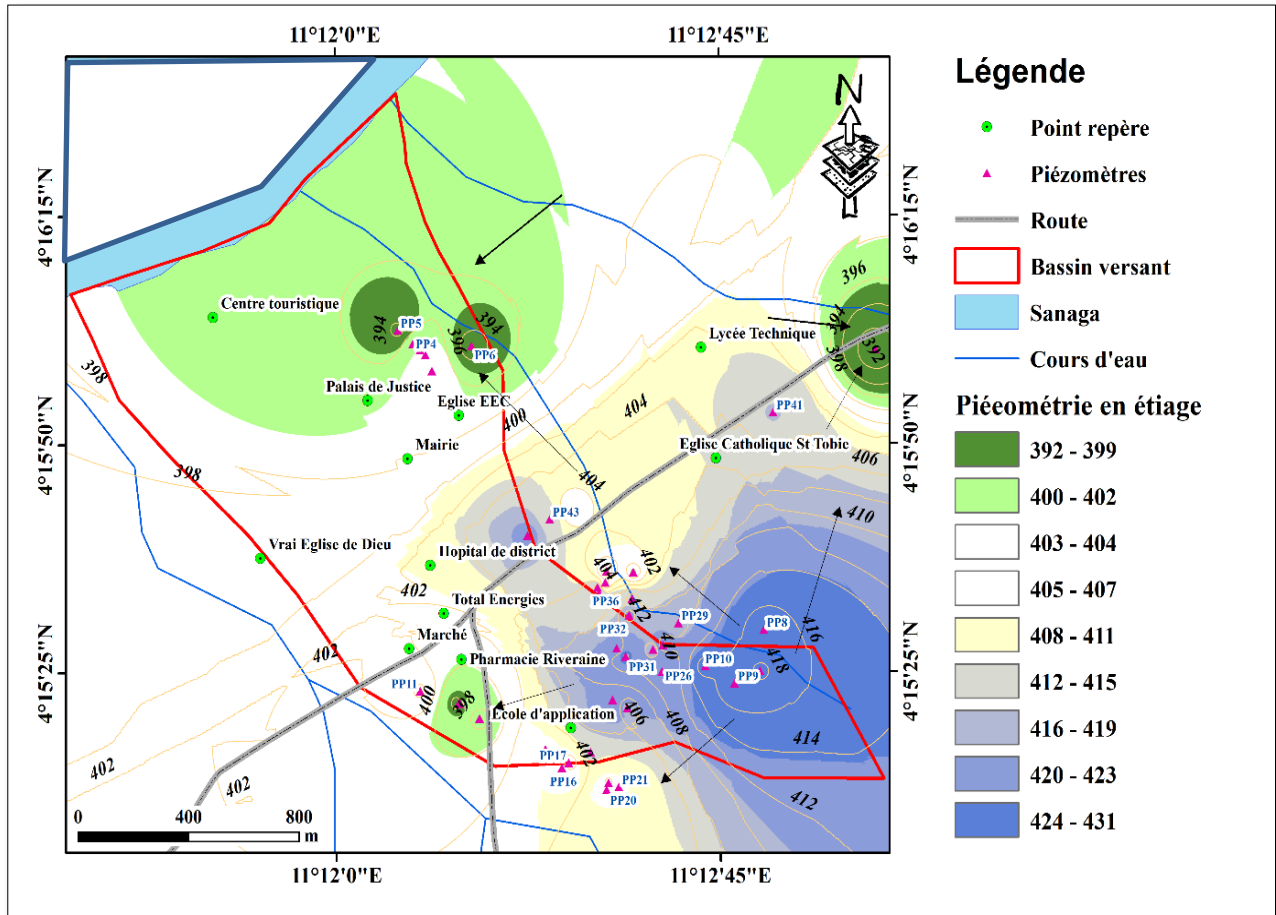


Figure 17 : Carte piézométrique en période d'étiage

3.1.2. Propriétés hydrodynamiques

3.1.2.1. Coefficient de perméabilité par la méthode granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée selon le protocole décrit dans le chapitre précédent. Les pourcentages des différentes classes granulométriques dans le matériau sont présentés dans le **Tableau 14**.

Tableau 14 : composition textural de la ZS et ZNS

Code	Classes	Argiles	Limons fins	Limon grossiers	Sables Fins	Sables Grossiers	Total
	Diamètre (mm)	0,003	0,02	0,05	0,3	2	
ZS	Pourcentage	10,266	12,242	11,593	17,922	47,977	100%
	Pourcentage Cumulé croissant	10,266	22,508	34,101	52,023	100	
ZNS	Pourcentage	36,684	15,967	11,888	17,232	18,227	100%

Code	Classes	Argiles	Limons fins	Limon grossiers	Sables Fins	Sables Grossiers	Total
	Diamètre (mm)	0,003	0,02	0,05	0,3	2	
	Pourcentage Cumulé croissant	36,684	52,651	64,539	81,772	100	

Les résultats numériques obtenus ont conduit à l'établissement des courbes granulométriques (figure 18).

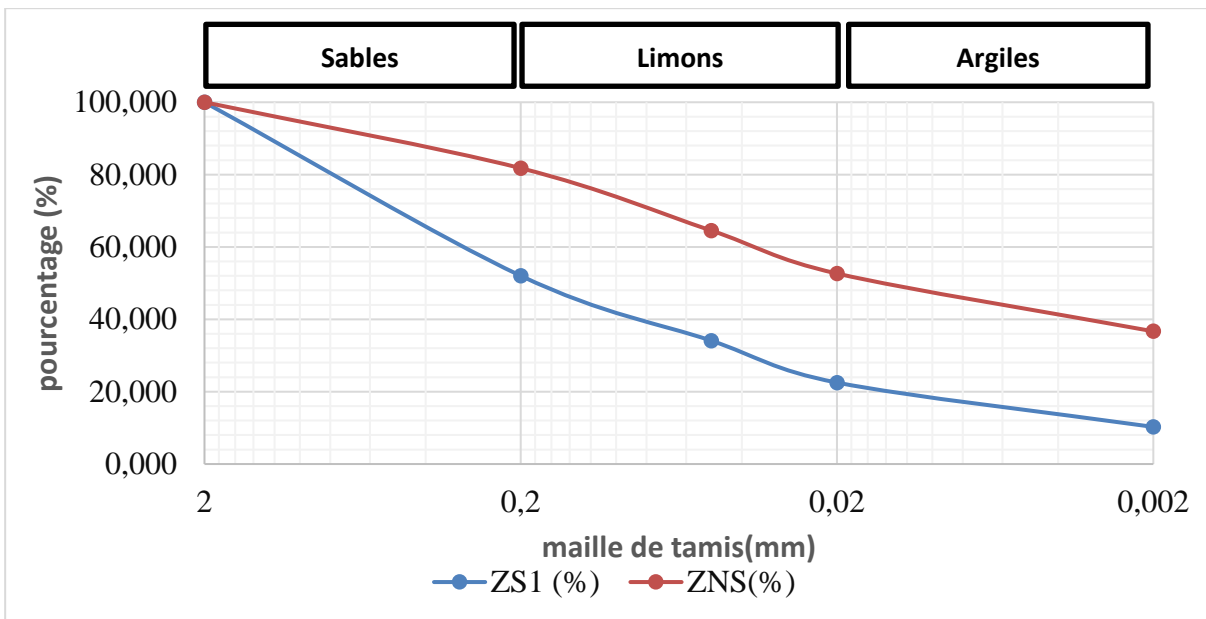


Figure 18 : courbe granulométrique des échantillons de la ZNS et de la ZS

L'exploitation de la courbe granulométrique ci-dessus permet de relever les valeurs des variables d_{10} , d_{60} , Cu , K , ω et dans chaque zone (**Tableau 15**).

Tableau 15 : Paramètres hydrodynamiques de la ZNS et la ZS.

Code	$d_{10}(mm)$	$d_{60}(mm)$	Cu	$K(m/s)$	Teneur en eau (ω)	Densité Apparente (d)	Porosité efficace (Ne)
ZNS	0,001	0,03	0,033	$1 \cdot 10^{-6}$	0,0225	1,21	0,2582
ZS	0,002	0,3	15	$4 \cdot 10^{-4}$	0,0374	1,29	0,1406

3.1.2.2. Estimation du coefficient de perméabilité par l'essai Porchet

*L'essai d'infiltration Porchet a été réalisé selon le protocole décrit dans le chapitre précédent. Les descentes ($h + R/2$) correspondantes par rapport aux différentes tranches horaires dans le matériau sont présentées dans les tableaux ci-dessous. Chaque tableau (**Tableau 16 à***

Tableau 20) est muni d'une représentation graphique de la courbe $\log(h + R/2)$.

Tableau 16 : Essai d'infiltration Porchet au point PB1

Temps(s)	H(m)	(H+(R/2)) en m
0	0,5	0,525
30	0,31	0,335
60	0,27	0,295
120	0,2	0,225
180	0,19	0,215
240	0,18	0,205
300	0,17	0,195
600	0,16	0,185
900	0,14	0,165
1200	0,13	0,155
1500	0,12	0,145
1800	0,1	0,125
2400	0,1	0,125
3000	0,07	0,095
3600	0,06	0,085
4800	0	0,025

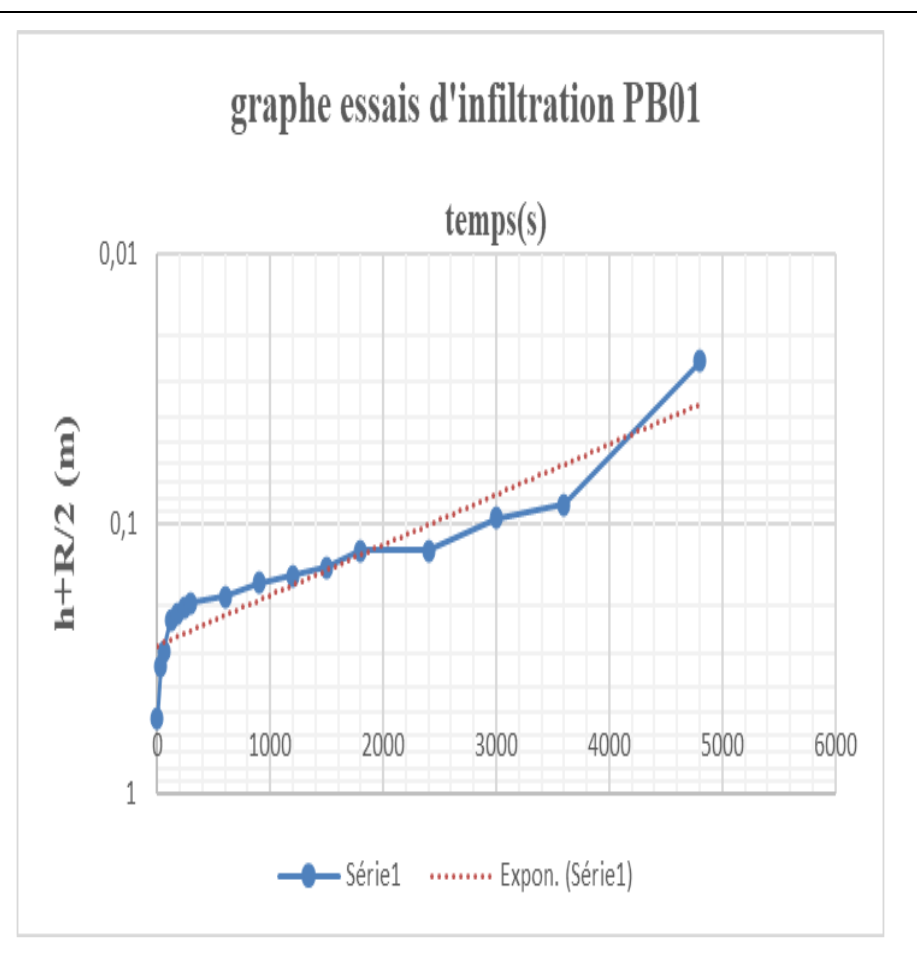


Tableau 17 : Essai d'infiltration Porchet au point PB 02

Temps(s)	H(m)	(H+(R/2)) en m
0	0,5	0,525
30	0,43	0,455
60	0,4	0,425
120	0,36	0,385
180	0,34	0,365
240	0,32	0,345
300	0,3	0,325
600	0,24	0,265
900	0,22	0,245
1200	0,21	0,235
1500	0,2	0,225
1800	0,18	0,205
2400	0,17	0,195
3000	0,15	0,175
3600	0,11	0,135
4800	0,07	0,095

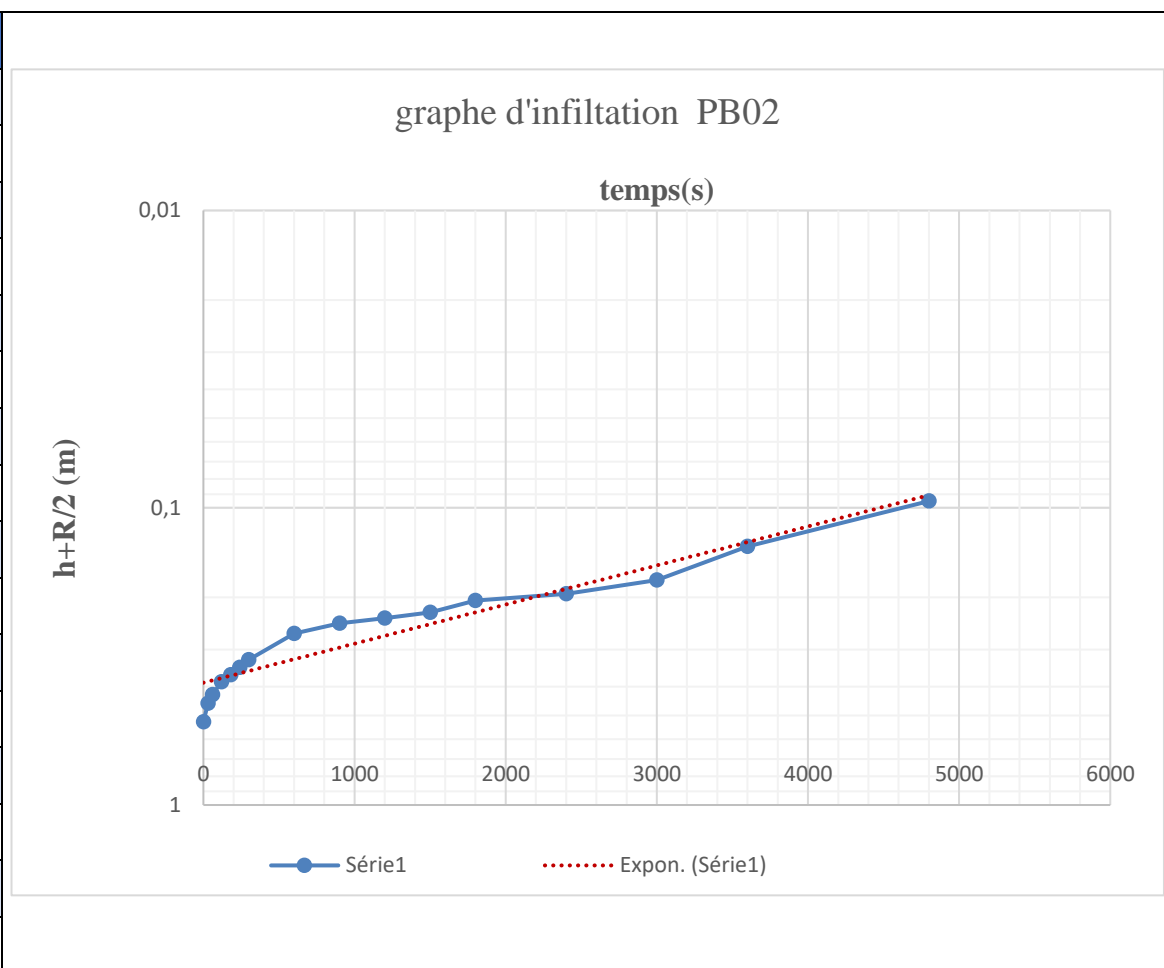


Tableau 18 : Essai d'infiltration Porchet au point PB03

Temps(s)	H(m)	(H+(R/2)) en m
0	0,5	0,525
30	0,4	0,425
60	0,38	0,405
120	0,36	0,385
180	0,34	0,365
240	0,3	0,325
300	0,27	0,295
600	0,24	0,265
900	0,2	0,225
1200	0,17	0,195
1500	0,14	0,165
1800	0,12	0,145
2400	0,09	0,115
3000	0,06	0,085
3600	0,03	0,055
4800	0	0,025

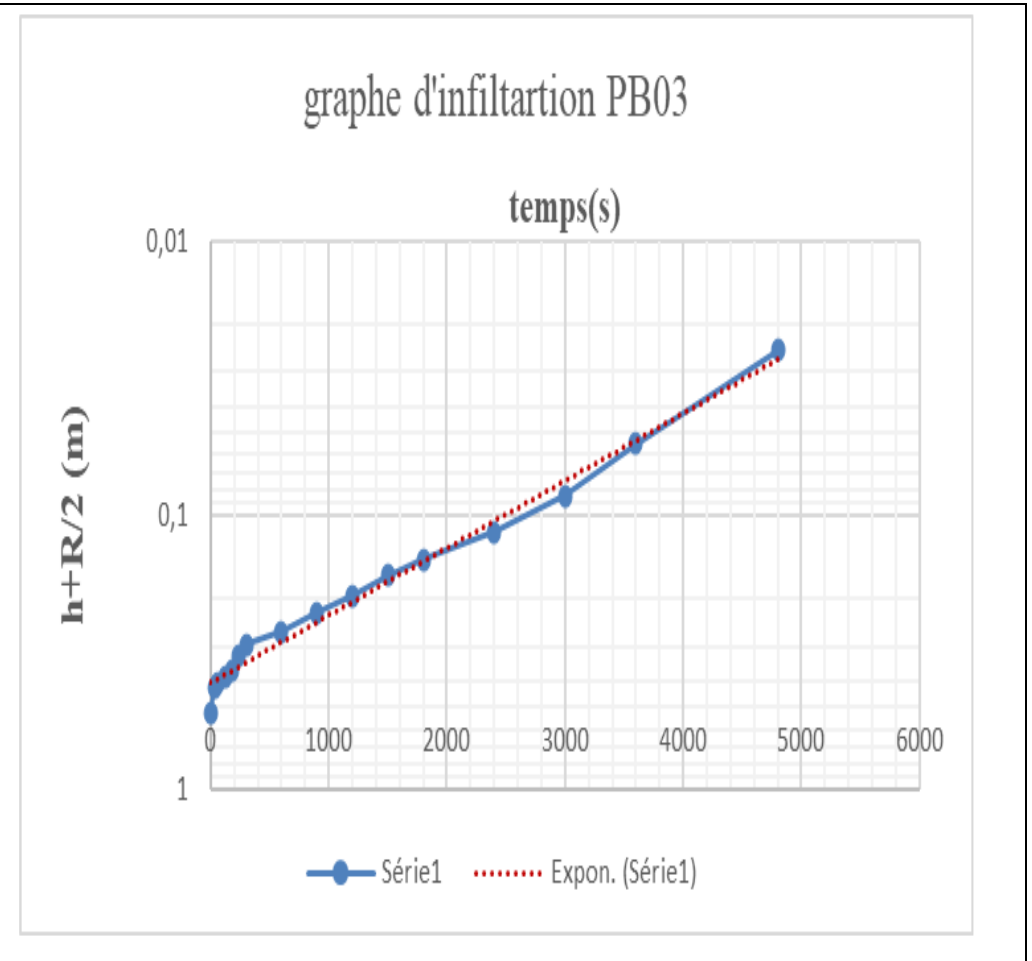


Tableau 19 : Essai d'infiltration Porchet au point PB04

Temps(s)	H(m)	(H+(R/2)) en m
0	0,5	0,525
30	0,42	0,445
60	0,4	0,425
120	0,35	0,375
180	0,32	0,345
240	0,28	0,305
300	0,25	0,275
600	0,23	0,255
900	0,22	0,245
1200	0,2	0,225
1500	0,18	0,205
1800	0,15	0,175
2400	0,13	0,155
3000	0,09	0,115
3600	0,05	0,075
4800	0	0,025

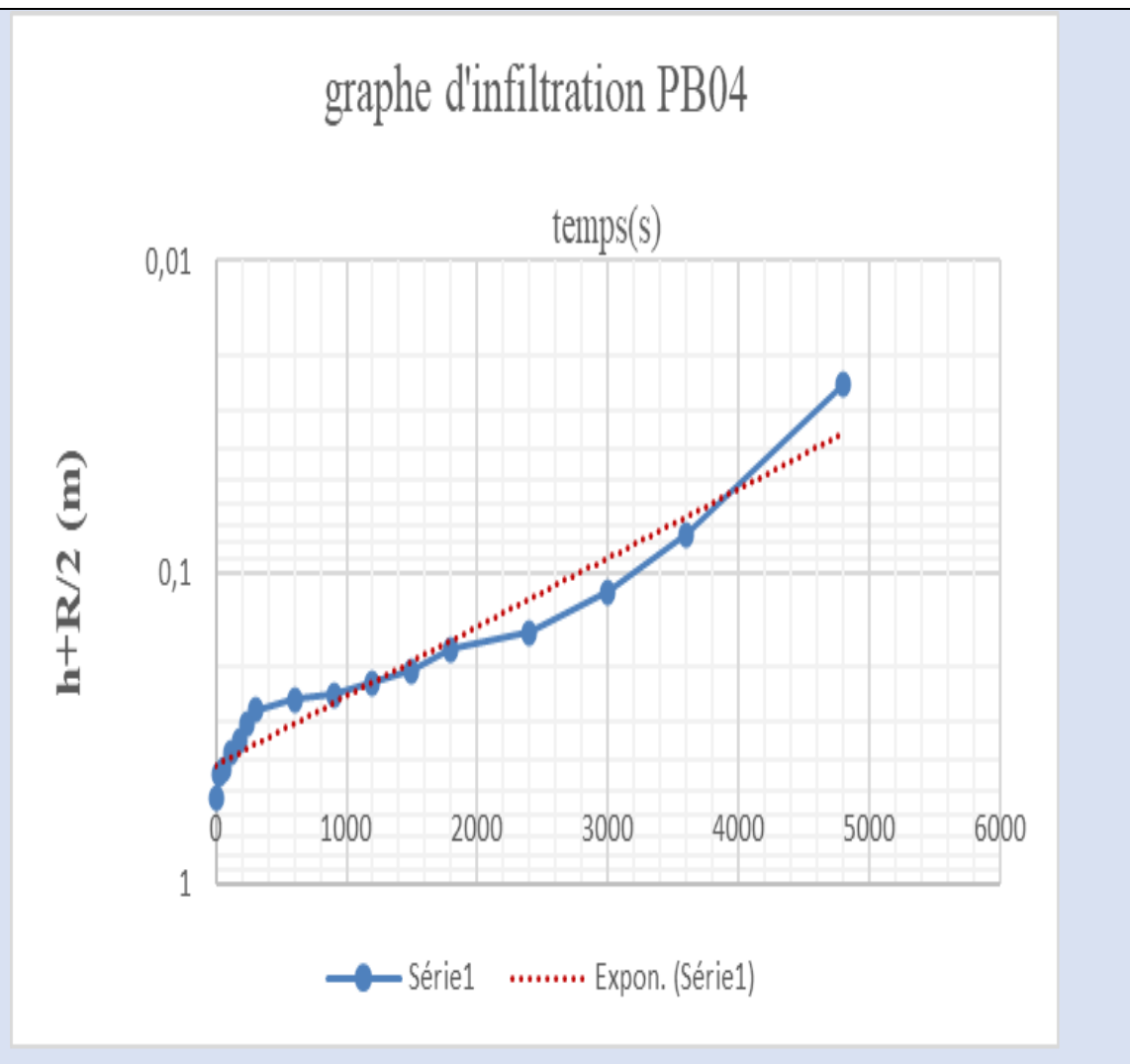
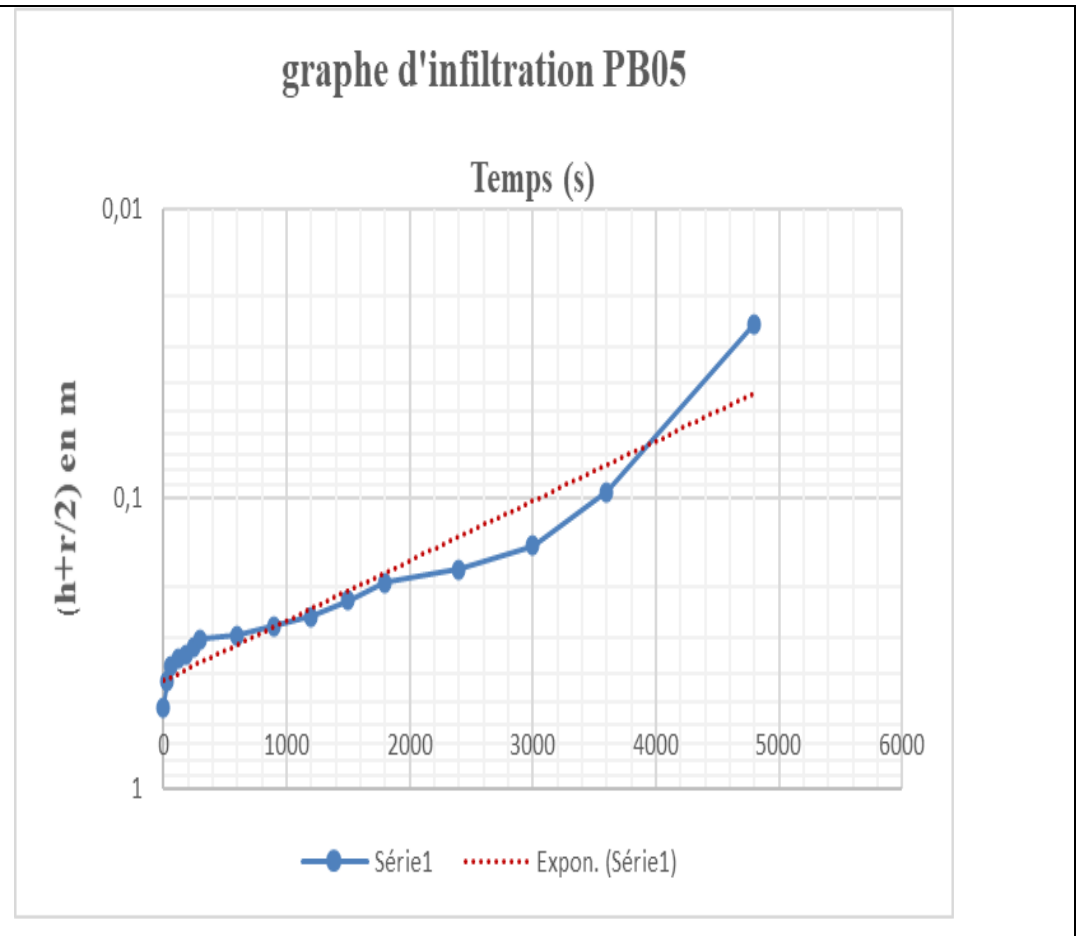


Tableau 20 : Essai d'infiltration Porchet au point PB05

Temps(s)	h(m)	(h+(R/2)) en m
----------	------	----------------

0	0,5	0,525
30	0,4	0,425
60	0,35	0,375
120	0,33	0,355
180	0,32	0,345
240	0,3	0,325
300	0,28	0,305
600	0,27	0,295
900	0,25	0,275
1200	0,23	0,255
1500	0,2	0,225
1800	0,17	0,195
2400	0,15	0,175
3000	0,12	0,145
3600	0,07	0,095
4800	0	0,025



À partir des pentes de chaque courbe ci-dessus, l'on calcule les coefficients de perméabilité de la ZNS de chaque point d'essai. Les résultats sont consignés dans le **Tableau 21**.

Tableau 21 : Coefficients de perméabilités de chaque essai de la ZNS.

Code essai	Pente de la courbe de tangente P	Coefficient de perméabilité K (m/s)
PB01	-2100	2,738E-05
PB02	-2200	2,6136E-05
PB03	-3000	1,9167E-05
PB04	-2500	2,30E-05
PB05	-2150	2,6744E-05

3.1.2.3. Présentations des classes des zones de vulnérabilité (DRASTIC)

La reclassification selon le modèle DRASTIC et l'extraction des informations à l'intérieur du bassin ont permis d'avoir une répartition des profondeurs en 05 classes dont les superficies sont consignées dans le tableau ci-dessus. Le paramètre D montre clairement que la vulnérabilité de cette nappe selon le modèle DRASTIC évolue en sens inverse avec la profondeur à l'eau, plus la profondeur est grande plus la vulnérabilité est faible et inversement. La répartition spatiale des profondeurs est illustrée dans le **Tableau 22**.

Tableau 22 : paramètre D

Profondeur (m)	Coefficient	Superficie (km ²)	Pourcentage
1,5 – 4,5	9	0,056115	2,61
4,5 - 9	7	1,725805	80,27
9 - 15	5	0,36249	16,86
15 - 23	3	0,005375	0,25

Les profondeurs qui varient entre 1,5 et 4,5 m couvrent 2,61% de la zone d'étude, elles sont les plus vulnérables à la pollution et se localisent principalement dans la zone du marché et la pharmacie. La classe comprenant les profondeurs 4,5 à 9 m est la plus dominante et couvre plus de 80,27% de la zone d'étude. Toute l'aire géographique allant de la station totale jusqu'à la Sanaga est dans cette classe.

La classe de profondeur allant de 9 à 15 m couvre 16,86% de la superficie de la zone d'étude, et couvre entièrement le secteur Sud-Est près de l'école publique d'application. La **Figure 19** présente la répartition des profondeurs dans la zone d'étude.

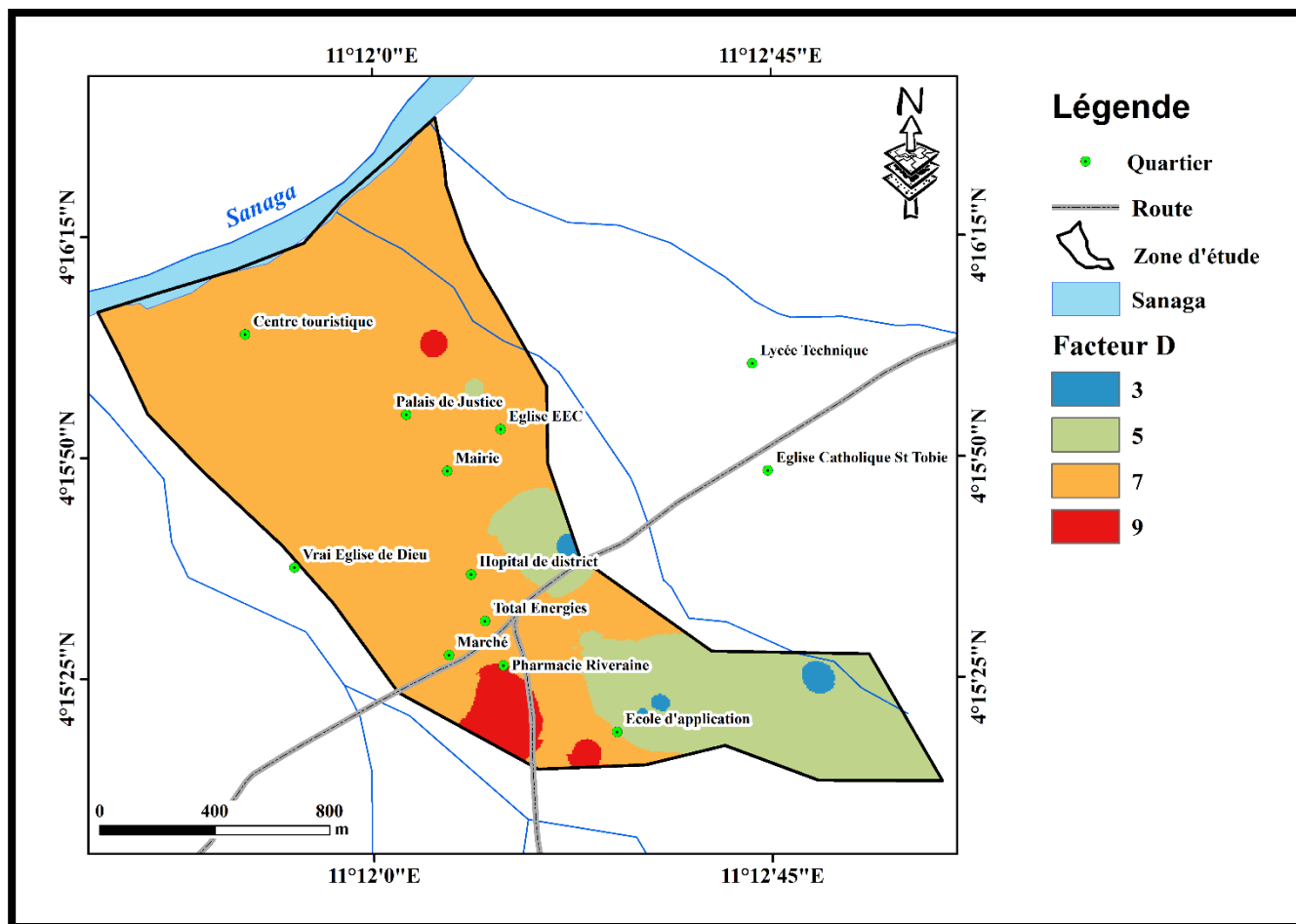


Figure 19 : Carte de répartition des profondeurs. (Facteur D)

La matrice de confusion obtenue montre que la classification du sol réalisée a donné des résultats acceptables, reflétant le terrain. Cette validation statistique donne une précision globale de 91,4% et un coefficient Kappa de 0,89 (Tableau 23).

Tableau 23 : Matrice de confusion

	Eau	Sols nus/ Bâties	Culture	Forets	Pourcentage
Sols nus/ Bâties	8,18	91,42	7,95	0,00	57,37%
Culture	0,11	8,02	91,05	10,07	23,15%
Forets	1,00	0,00	1,95	89,03	19,48%
Total	100	100	100	100	100

La reclassification de la recharge selon le modèle DRASTIC a permis de ressortir 03 classes dont les coefficients varient entre 1 et 6. Les zones associées à de fortes recharges ont des coefficients élevés tandis que celles ayant des recharges faibles ont des coefficients faibles. Les zones de recharge faible sont plus concentrées dans les zones bâties et au niveau des sols recouverts soit par le bitume soit par le béton. En effet, l'aménagement de ses zones par l'homme (urbanisation) favorise davantage le

ruissellement des eaux météoriques que leur infiltration. Le reste des zones sont plus sujettes à l'infiltration (**Tableau 24**).

Tableau 24 : Classe des poids et superficie de recharge nette

Recharge (mm)	Coefficient	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
0 – 50	1	0,42	17,27
50 – 100	3	1,29	52,77
100 - 140	6	0,73	29,96

La classe de recharge allant de 0 à 50 mm couvre 14,01% de la zone d'étude. La classe 50 – 100 mm couvre 22,64% et la classe 100 – 140 mm couvre 63,35% de la zone d'étude (**Figure 20**).

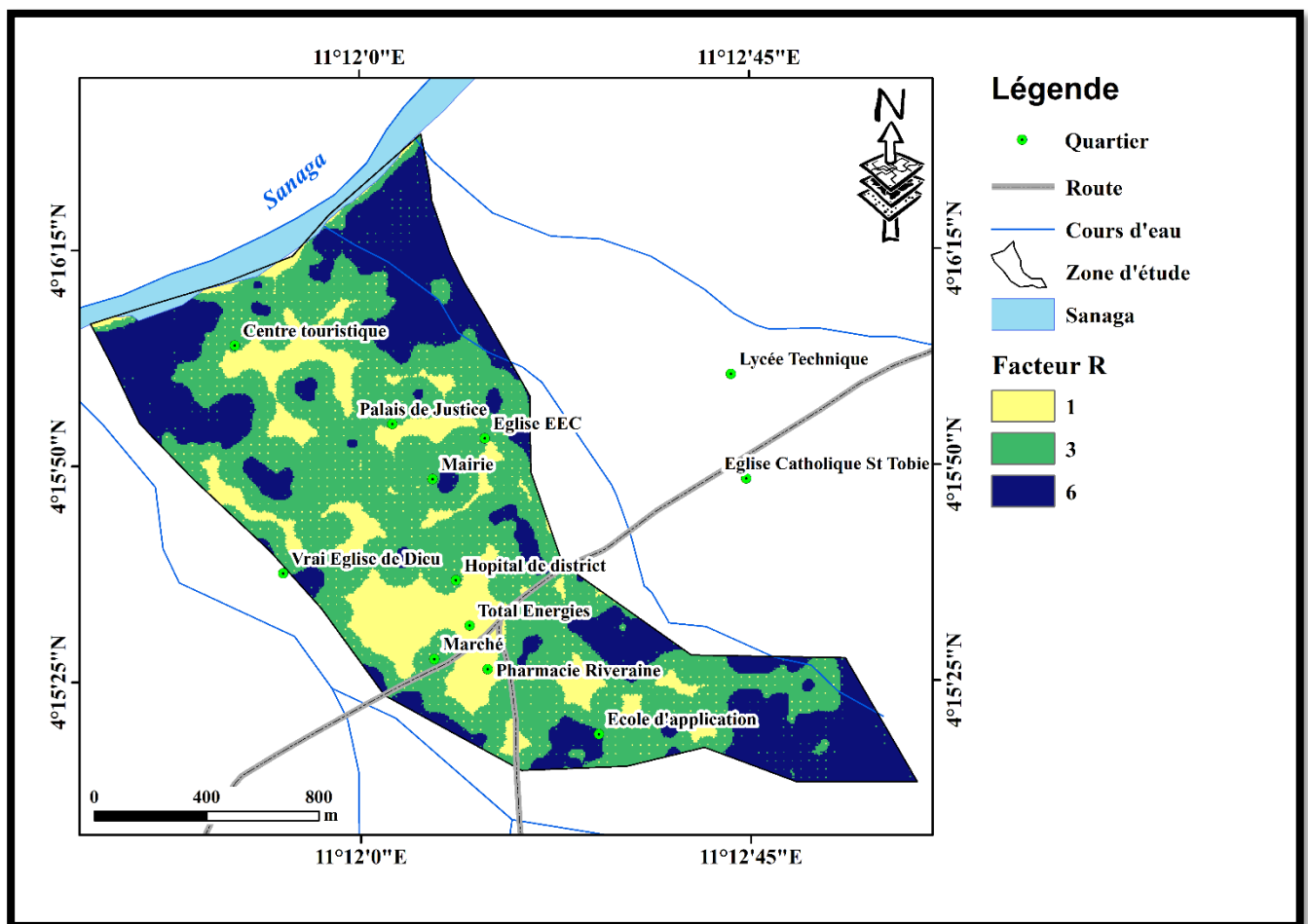


Figure 20 : carte de recharge (Facteur R)

La reclassification de la lithologie de l'aquifère a permis de faire ressortir 02 classes. Les zones de haute vulnérabilité indiquant des endroits où les eaux souterraines sont les plus susceptibles d'être contaminées par des activités humaines ou des sources de pollution. Ces zones peuvent être identifiées sur la carte avec le coefficient 4 et renvoyant aux orthogneiss. Les paragneiss sont moins favorables et porte le coefficient 2 (**Tableau 25**).

L'analyse des cartes géologiques existantes couplées aux observations de terrain ont permis de définir 02 types d'aquifères à savoir : les orthogneiss et les paragneiss. Les orthogneiss couvrent environ 82,95% de la zone d'étude, tandis que les paragneiss couvrent 17,05%. Les orthogneiss sont particulièrement parcourue la faille de la Sanaga. Cette répartition est illustrée dans le **Tableau 25** et **Figure 21**.

Tableau 25 : répartition des propriétés des différents aquifères

Lithologie	Coefficient	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
Paragneiss	2	0,42	17,06
Orthogneiss	4	2,03	82,94

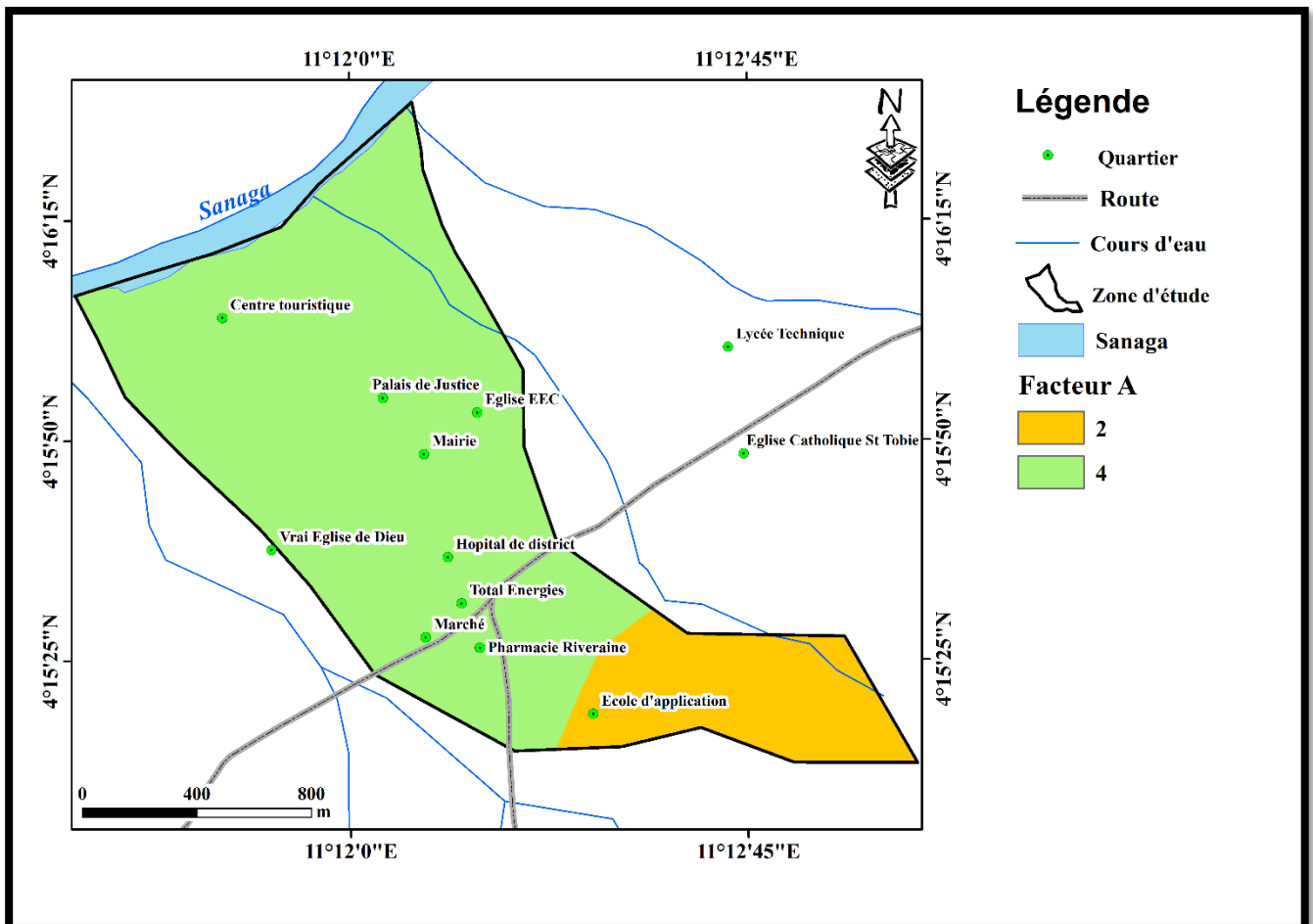


Figure 21 : Carte de répartition des aquifères (Facteur A)

La carte des sols met en exergue 02 types de sol à savoir : les sols hydromorphes et les sols à sesquioxides. Les sols hydromorphes ont la caractéristique d'avoir une couleur grisâtre due à l'accumulation de la matière organique et ont pour la plupart du temps une texture argileuse. Les sols à

sesquioxydes ont une couleur rouge brun à cause de la présence de fer. Ils ont pour la plupart du temps une texture argileuse ou limoneuse. (Tableau 26).

Tableau 26 : Pourcentage des sols

Sol	Coefficient	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
Sol hydromorphes	2	1,50	61,26
Sol à sesquioxydes	5	0,95	38,74

La classification du type de sol en fonction du modèle DRASTIC a permis de ressortir 02 classes (Figure 22). La classe correspondant aux sols hydromorphes à la cote de 2 et couvre le Nord – Nord-ouest de la zone d'étude. Les sols à sesquioxydes couvrent la zone Sud et Sud-Est de la zone d'étude.

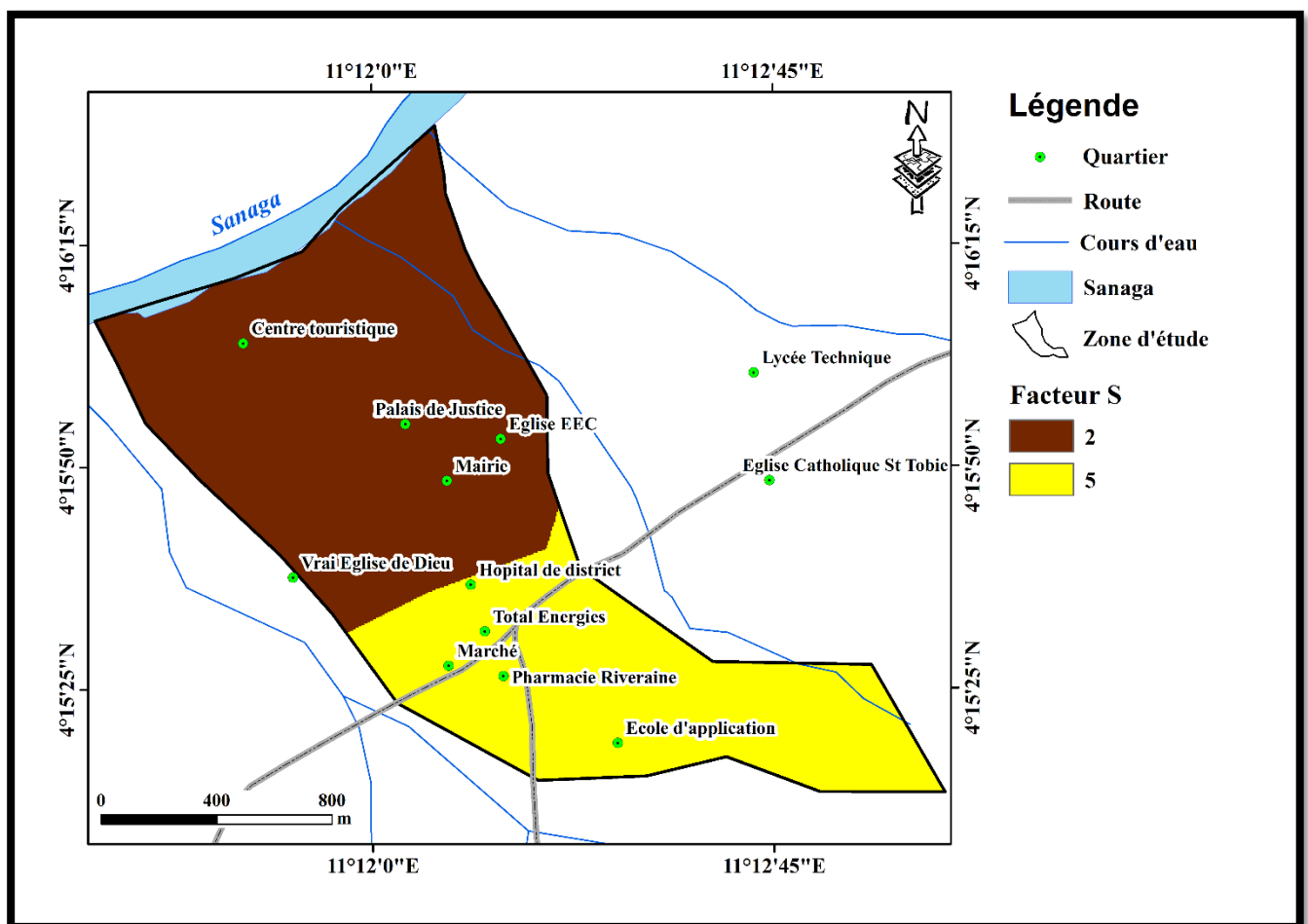


Figure 22 : carte du type de sol (Facteur S)

La reclassification des pentes selon le modèle DRASTIC a permis de ressortir 04 classes dont le coefficient varie entre 3 et 10. Les classes associées aux faibles pentes ont les plus grands coefficients tandis que celles associées aux fortes pentes ont les coefficients faibles. Les pentes varient entre 0 et 16,3% avec une moyenne de 5,05% (Tableau 27).

Tableau 27 : indice des pentes

Pente (%)	Coefficient	Superficie (km ²)	Pourcentage
0 - 2	10	0,77	31,49
2 – 6	9	0,745535	30,43
6 – 12	5	0,4949	20,2
12 – 18	3	0,437815	17,87

La carte obtenue (**Figure 23**) montre que la quasi-totalité du relief de la zone d'étude est formé de sommets et de bas-fonds qui sont drainé par les eaux qui se jettent tous dans la Sanaga. Cette configuration géomorphologique impose que, tous les polluants issus des hautes altitudes et fortes pentes s'accumulent dans les basses altitudes et faibles pentes.

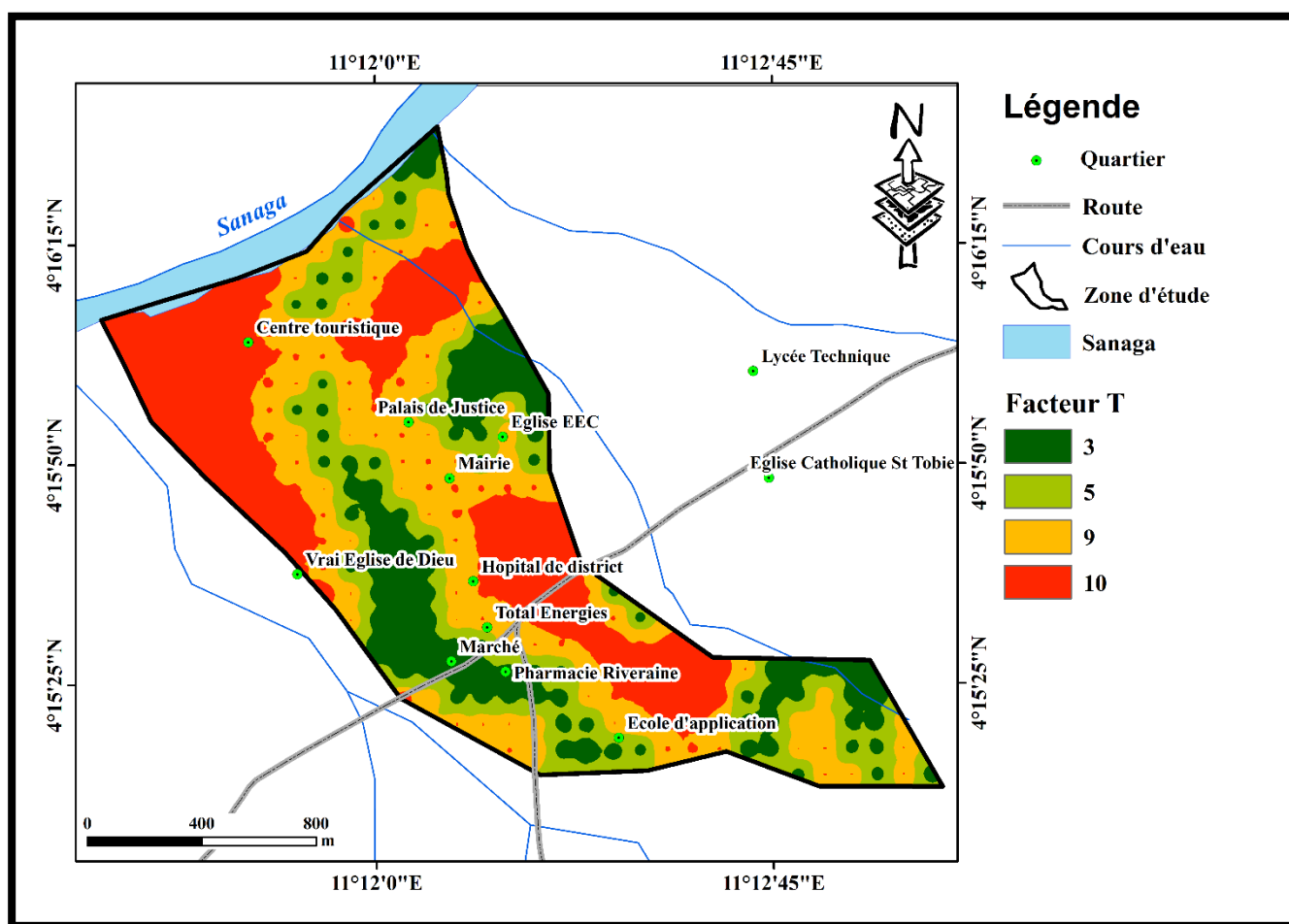


Figure 23 : carte de pente (Facteur T)

La zone vadose est également appelé zone non saturée. C'est l'ensemble constitué de la surface du sol et de la partie du sous-sol qui se situe au-dessus de la nappe phréatique. Les résultats sur les sols rapportés dans cette étude sont liés à la composition, la structure et aux propriétés hydrogéologique la zone vadose (**Tableau 28** et **Figure 24**).

Tableau 28 : paramètre de la zone non saturée

Sol	Coefficient	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
Sol hydromorphes	3	1,50	61,26
Sol à sesquioxydes	6	0,95	38,74

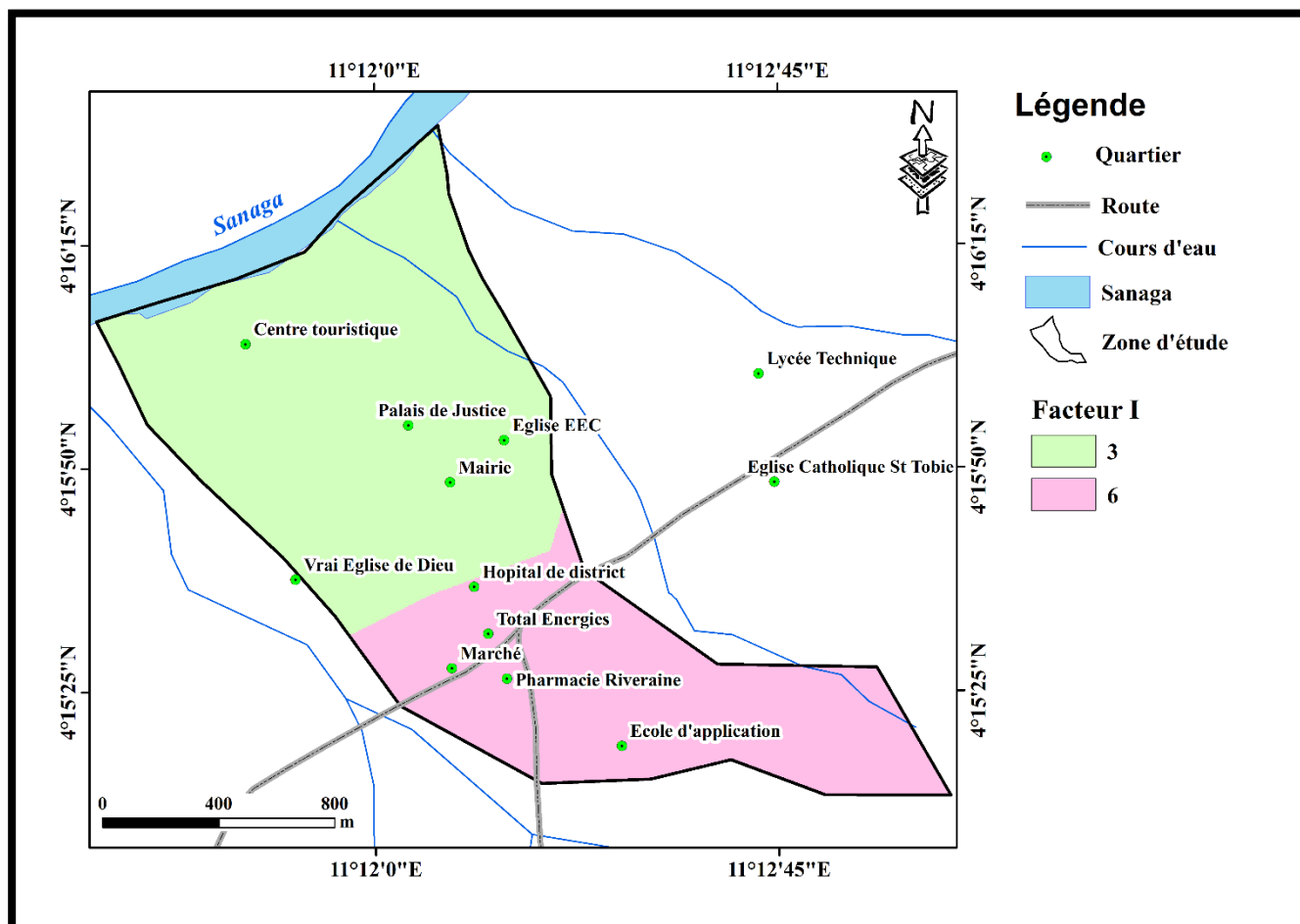


Figure 24 : carte de perméabilité (Facteur I)

La conductivité hydraulique désigne la capacité des formations géologiques à transmettre de l'eau. Elle contrôle elle aussi la migration des contaminants de la surface vers la nappe. La conductivité hydraulique est obtenue par affectation d'un coefficient de perméabilité pour chaque classe lithologique de la zone d'étude (

Tableau 29). Ce facteur est obtenu par interpolation IDW des données récoltées. La carte obtenue a été par la suite reclassifiée puis pondérée.

Tableau 29 : paramètre de perméabilité

ZONE	Point	x	y	K (m/s)
Prison	P1	744509	471946	2,7381E-05
SODECAO	P2	744463	471982	2,6136E-05
ENIEG	P3	745720	470883	1,9167E-05
NQ	P4	744943	470618	0,000023
CENTRE	P5	744636	470772	2,6744E-05

L'on observe que la perméabilité varie entre $1,91 \times 10^{-5}$ et $2,74 \times 10^{-5}$ m/s. Les résultats de perméabilité appartiennent à la même classe texturale. Ces données ont été par la suite spatialisées par interpolation (IDW). La carte obtenue montre la répartition spatiale de la perméabilité. Elle montre que les perméabilités les plus faibles dominent près de la prison, la SODECAO et CENTRE tandis que les plus fortes dominent près du Nouveau Quartier (NQ) et de L'ENIEG. La perméabilité est un paramètre important qui peut affecter le mouvement de l'eau dans un aquifère, dans le cadre de la méthode DRASTIC. Or cette perméabilité plus ou moins constante de l'aquifère n'influencera pas grandement les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité des nappes.

Tableau 30 : Classification de la perméabilité selon DRASTIC

Perméabilité (m/s)	Coefficient	Superficie (km ²)	Pourcentage
$1,1 \cdot 10^{-5} - 3,3 \cdot 10^{-3}$	1	2,45	100
$3,3 \cdot 10^{-3} - 8,1 \cdot 10^{-3}$	9	/	/
$8,1 \cdot 10^{-3} - 1,14 \cdot 10^{-2}$	5	/	/

L'obtention de la carte de conductivité a été possible grâce à la reclassification des données de la perméabilité selon les critères DRASTIC. Elle a permis de ressortir qu'une seule classe suivant la **Figure 25** car sa variabilité est faible.

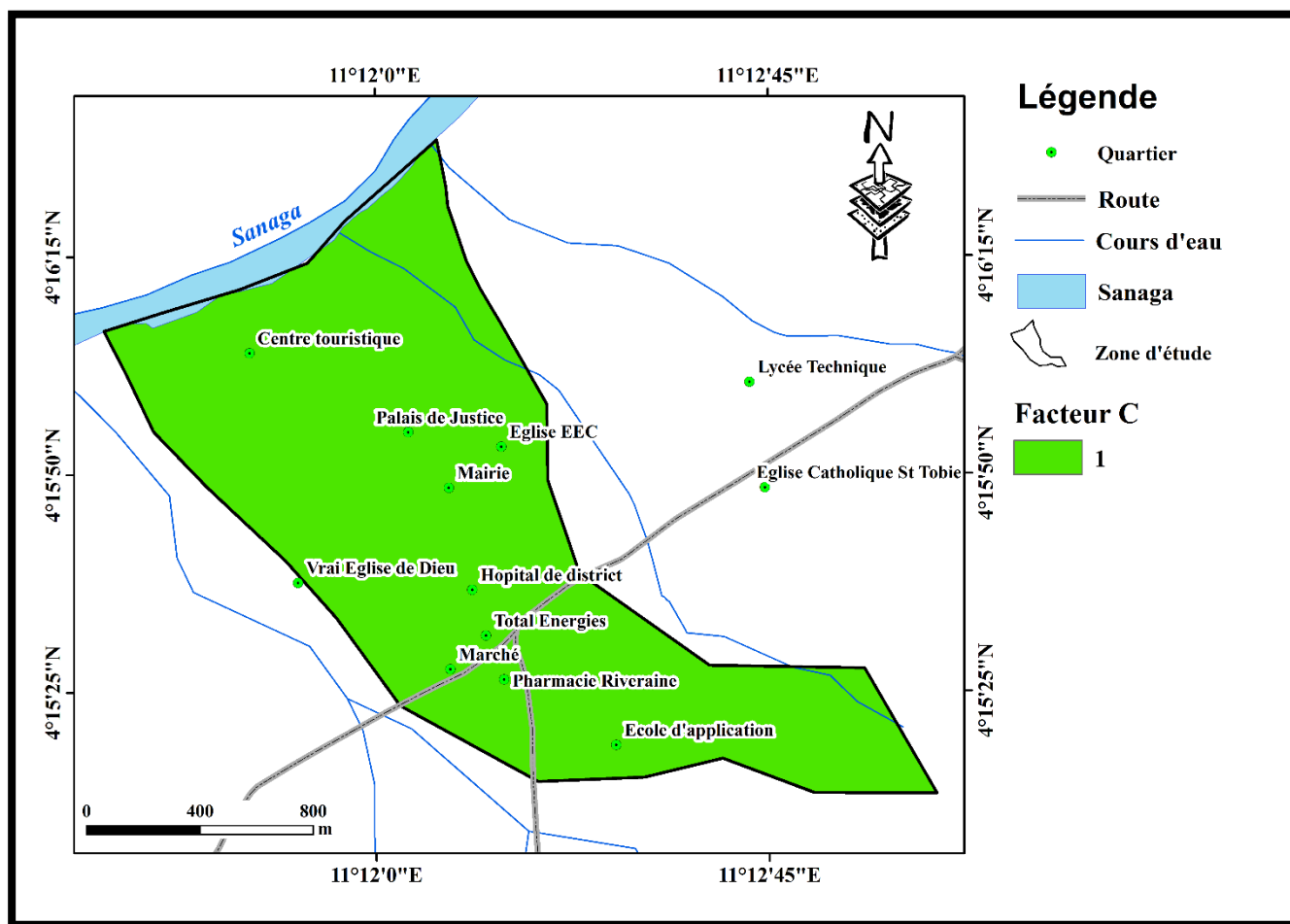


Figure 25 : Carte de conductivité (Facteur C)

3.1.3. Carte de vulnérabilité DRASTIC

L'interprétation de la carte de vulnérabilité DRASTIC obtenue a permis d'identifier les zones les plus sensibles à la contamination des eaux souterraines (Tableau 31) et de proposer des mesures de protection appropriées.

Tableau 31 : proportion DRASTIC (classe de vulnérabilité par zone).

Vulnérabilité DRASTIC	Qualificatif	Superficie (km ²)	Pourcentage
< 80	Très faible	0,97	39,55
80 – 120	Faible	0,77	31,25
120 – 160	Moyenne	0,49	20,08
160 – 200	Fort	0,20	7,31
> 200	Très fort	0,04	1,81

D'après les résultats du tableau 31, la superficie de la zone d'étude présente une vulnérabilité à la pollution faible (31,25%) à très faible (39,55%) bien que 20,08% représente une vulnérabilité à la pollution modérée ; (7,31%) représente une forte vulnérabilité et enfin 1,81% qui représente une très forte vulnérabilité (Figure 26). Notre zone d'étude présente un aspect satisfaisant. En effet, 70,8% de

notre zone d'étude présente une vulnérabilité faible à très faible. Ainsi donc, 05 classes sont présentées par cette méthode. La **Figure 27** présente la carte de vulnérabilité obtenue par la méthode DRASTIC.

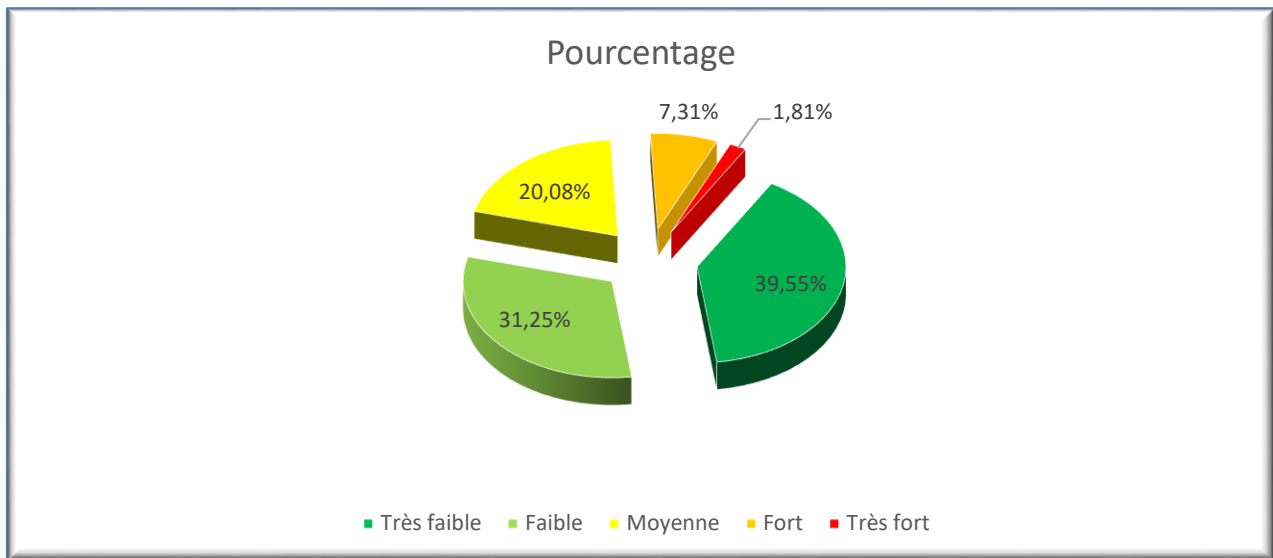
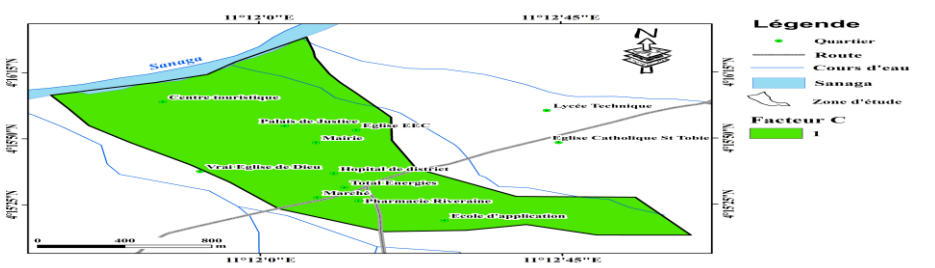
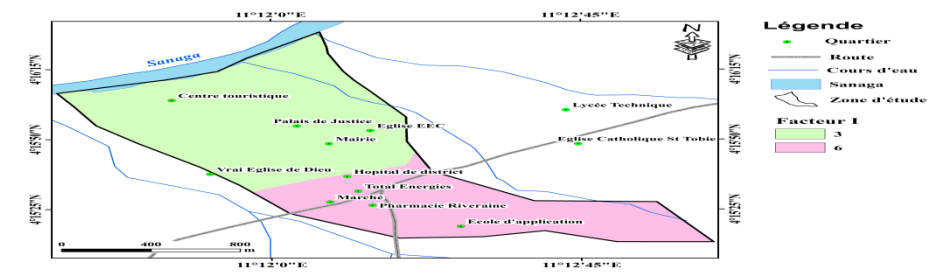
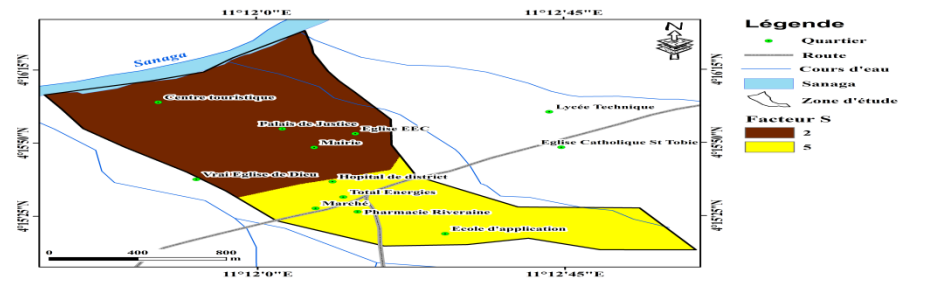
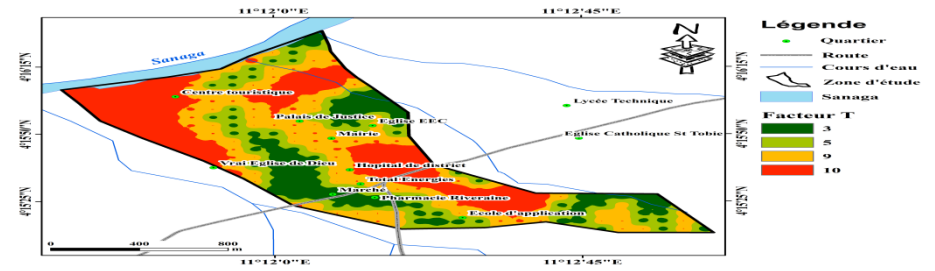
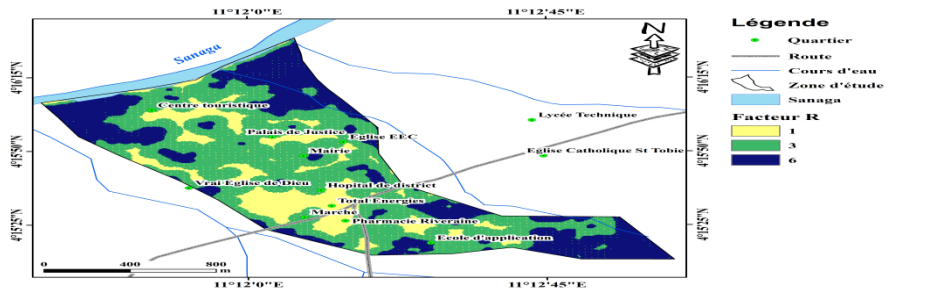
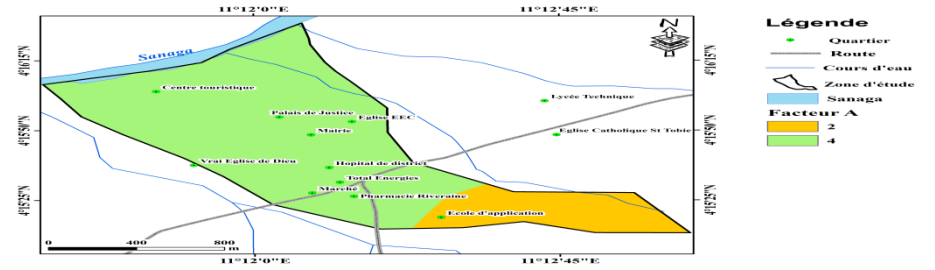
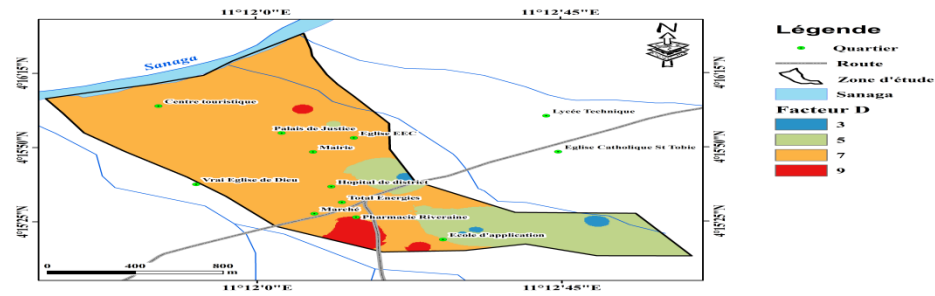


Figure 26 : graphique de Répartition des classes de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC



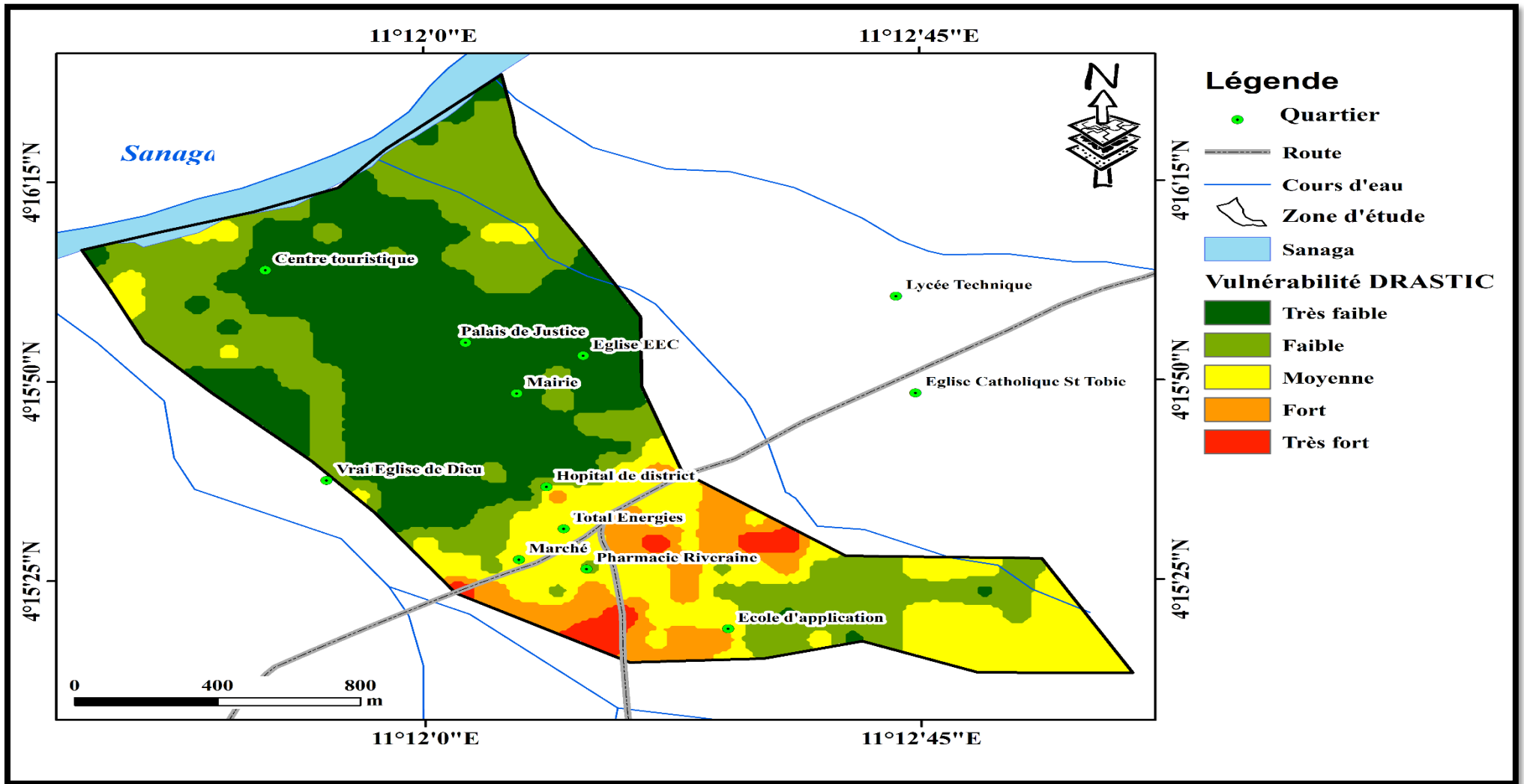


Figure 27 : Carte de vulnérabilité DRASTIC

3.2. Discussion des résultats

3.2.1. Données hydrogéologiques

L'hydrologie de la zone d'étude dégage distinctement la circulation des eaux souterraine. Les zones d'alimentation sont situées au SUD, SUD-OUEST de notre zone d'étude. La géologie de la zone d'étude est principalement formée de 02 type de sol à savoir les sols hydromorphes et les sols à sesquioxydes avec pour minéraux caractéristique : le Quartz ; la kaolinite ; l'hématite ; la muscovite et illite dans des proportions variables. La teneur en eau des sols varie de 10,32 à 26,35% (Yannick et al, 2022). Le régime hydrographique de notre zone d'étude est dense et permanent. Les principaux cours d'eau de la zone d'étude appartiennent au bassin versant de la Sanaga (Olivry, 1986). L'on peut ainsi citer : la Lékié, la Ngobo, la Mbgaba et d'autres qui sont plus petits comme Mekolo, Ndoup, Doua, ce qui favorise la recharge des nappes phréatiques. De même, les formations géologiques sont principalement des schistes et des grès qui influencent la perméabilité.

3.2.2. Relation entre les données hydroclimatiques et piézométrique

Dans son étude sur les ressources en eau du socle au Cameroun, Sighomnou (2004), a souligné l'impact du climat sur la disponibilité des eaux souterraines. Il a noté que les variations climatiques influencent directement la recharge des aquifères. A Monatélé, les données montrent une tendance à la baisse des précipitations annuelles, passant d'une moyenne de 1800 mm dans les années 1980 à 1600 mm ces dernières années. Cela concorde avec les observations de Sighomnou concernant la vulnérabilité accrue des aquifères face à la diminution des ressources en eau. Dewandel et al. (2011), ont également effectués des recherches sur le processus hydrogéologique dans le bassin versant de Nsimi a montré que les aquifères de mi- pente jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau. Ils ont observé que la variabilité des niveaux d'eau dans les piézomètres est étroitement liée aux précipitations. Les données de Monatélé corroborent cette observation, avec des fluctuations saisonnières marquées dans les niveaux d'eau, ce qui souligne l'importance de la gestion des ressources en eau face à la variabilité climatique.

3.2.3. Carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC

D'après l'équation du bilan hydrique, on obtient 1696,38 mm de précipitation que reçoit la zone de Monatélé. Sur cette quantité d'eau, 63% sont captées pendant le processus d'évapotranspiration (1082,67 mm) ; 25,53% sont ruisselées (433,04 mm) et 10,65% s'infiltré dans le sol (180,67 mm).

L'utilisation des données du Climatic Research Unit (CRU) pour la spatialisation de la pluviométrie est une pratique courante dans le domaine de la climatologie et de la météorologie. Le CRU est un centre de recherche renommé qui collecte, analyse et archive des données climatiques mondiales, y compris les précipitations. Les données du CRU sont disponibles sous forme de grilles spatiales avec une résolution temporelle et spatiale spécifique.

La localité de Monatélé est confrontée à des défis croissant en matière de gestion des ressources en eau souterraines. L'interprétation de la carte de vulnérabilité DRASTIC obtenu a permis d'identifier les zones les plus sensibles à la contamination des eaux souterraines et de proposer des mesures de protection appropriées tels que la sensibilisation des populations ; la protection des zones de vulnérabilité ; l'implémentation des plans de gestion des ressources en eau. En effet, l'étude de la vulnérabilité des aquifères dans notre zone d'étude située à Monatélé, utilisant la méthode DRASTIC, révèle des résultats intéressants. Avec 39,55% de la zone à très faible vulnérabilité et 31,25% à vulnérabilité faible, ces résultats sont en accord avec ceux de Dewandel et al. (2011), qui ont observé des vulnérabilités similaires dans les aquifères de socle du Cameroun. De même, Feumba et al. (2015) ont évalué la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke, notant une vulnérabilité faible et moyenne de 35%.

Foster (2012), a également souligné l'importance de la géologie dans l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères, ce qui est pertinent pour les 20,08% de la zone à vulnérabilité moyenne identifiée. Sighomnou (2004) et Ndam et al. (2020) ont mis en avant des défis liés à la gestion des ressources en eau dans des contextes similaires, renforçant l'idée que la vulnérabilité forte (7,31%) nécessite une attention particulière pour la protection des aquifères.

Cette étude comparative montre que les résultats de notre zone d'étude sont cohérents avec les tendances observées dans d'autres recherches, soulignant l'importance d'une gestion intégrée des ressources en eau face aux menaces potentielles.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail réalisé dans la Commune de Monatélé située dans la région du Centre Cameroun Département de la Lékié est dégradée par une surexploitation des sols pour des activités pastorales. Elle est connue pour ses côtes qui jonchent le fleuve Sanaga où les hommes y pratiquent la pêche et l'exploitation de sable.

Notre étude visait à évaluer la vulnérabilité des aquifères dans la Commune de Monatélé en utilisant la méthode DRASTIC. Nous avons cherché à estimer la vulnérabilité des aquifères, à analyser les paramètres hydrodynamiques et à cartographier les zones sensibles à la pollution. Les précipitations dans la région sont relativement abondantes, avec une moyenne annuelle de 1695,79 mm/an. En utilisant les 7 paramètres du modèle DRASTIC, nous avons élaboré des cartes thématiques qui ont permis de dresser une carte de vulnérabilité. Les résultats montrent que les zones de faible et très faible vulnérabilité occupent une grande partie de la zone d'étude (70,8%), notamment dans les zones où la perméabilité des couches est forte et la circulation des eaux est fluide, le long du fleuve Sanaga. Les zones de vulnérabilité moyenne couvrent 20,08% de la zone d'étude, principalement au Sud-Est et à l'Est, où la perméabilité est faible et la profondeur est moins importante. Enfin, les zones de forte vulnérabilité ne représentent que 9,12% de la zone d'étude et se situent dans les zones à très faible profondeur des sources d'alimentation. La méthode DRASTIC s'est avérée efficace pour évaluer la vulnérabilité des aquifères, notamment grâce à la facilité de mise en œuvre et de report cartographique grâce au SIG.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

La Commune de Monatélé présente des défis uniques en matière de gestion des ressources en eau. L'on a recensé quelques perspectives de recherche qui pourraient être explorées dans cette Commune dans les années à venir :

- **Suivi longitudinal des niveaux d'eau** : mettre en place un réseau de piézomètres pour surveiller les variations saisonnières et annuelles des niveaux d'eau dans les aquifères. Cela permettra d'identifier les tendances à long terme et d'évaluer l'impact des activités humaines sur les ressources en eau.
- **Cartographie des zones de recharge** : utiliser les données satellitaires et des systèmes d'information géographique (SIG) pour identifier et cartographier les zones de recharge préférentielles des aquifères. Cela permettrait de mieux cibler les efforts de protection.
- **Suivi des changements d'occupation des sols** : suivre les changements d'occupation des sols et leur impact potentiel sur la recharge et la vulnérabilité des aquifères. Des techniques de télédétection pourraient être utilisées pour détecter les changements à grande échelle.
- **Suivi des échanges nappe –rivière** : installer des piézomètres et des capteurs de niveau d'eau le long du fleuve Sanaga pour quantifier les échanges entre les eaux souterraines et de surface. Cela permettrait d'évaluer l'impact des variations de débit du fleuve sur la recharge des aquifères.
- **Modèles couples eaux de surface-souterraines** : développer des modèles numériques couplés qui simulent les interactions entre le fleuve Sanaga et les aquifères adjacents.

REFERENCES

- Abdou Nasser Ngouh., Amidou kpoumie., G. Nyembe Etame., Aloysious Kothen lebga., Esse Ndjeng., J. R. Ndam Ngoupayou. (2020).** *Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé-Cameroun).* *European Scientific Journal ESJ.* V16n 15 P281.
- Action Contre la Faim., Herman, (2005).** *Eau- Assainissement-Hygiène pour les populations à risque.* Pp 190-194.
- A.Firmin Bon., j.R.NdamNgoupayou.,G.Ewodo Mboudou. (2016).** *Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun.* *Revue des Sciences de l'eau* 29 (2), Pp 149-166.
- Archambault J., Bize J., Margat J. (1968).** *Alimentation artificielle des nappes souterraines.* *BULL. B.R.G.M.,* 3 ; FRA ; NUM. 0001, P. A 35.
- Association pour le développement des initiatives pour de l'environnement (ADIE). (2015).** *Plan Communal de développement de la Commune de Monatélé.*
- Andrew j., Armstrong., Arun A., Azad., Taro Iguchi., Russell Z., Szmulewitz., Daniel P., Jeffrey., Baali F. (2007).** *Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et vulnérabilité d'un système karstique en zone semi-aride. Cas du plateau de chéria NE Algérien. Thèse de Doctorat d'Etat, Université d'Annaba-Badji Mokhtar.*
- Bagnouls P., Gaussen H. (1957).** *Les climats biologiques et leur classification.* *Annales de géographie* 66 (355), Pp 193-220.
- B. Tillement ., (1972).** *Hydrogéologie du Nord Cameroun. Thèse de doctorat université de Claude Bernard, Lyon, 1972, P. 1 A 294*
- Bon A.F., Ndam Ngoupayou J.R., Mboudou G.E. (2016).** *Caractérisation des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun.* *Revue des Sciences de l'eau* 29 (2), 149-166, 2016
- Castany H. (1998).** *Hydrogéologie : Principes et méthodes.* 236 p., réf. : 3 p.
- Chery L., Mardhel V., Pointet T. (2001).** *Les réseaux de mesure dans les eaux souterraines : quantité et qualité.* *Géologues (Paris).* 2001 Num 129, Pp 7-14.
- Danielopol D., L., Griebler C., Gunatilaka A., Notenboom. (2003).** *Etat actuel et perspectives d'avenir des écosystèmes d'eaux souterraines.* *Conservation de l'environnement* 30 (2), Pp 104-130.
- Datry T. (2003).** *Urbanisation et qualité des nappes phréatiques : réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale. Thèse de Doctorat. Université de Lyon.*

- Daira Djoret. (2000).** *Etude la recharge de la nappe du Chari Baguirmi (Tchad) par les méthodes Chimiques.* Thèse doctoral Université d'Avignon Pp 210-212.
- Daniel Sighomnou (2010).** *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau.* Thèse de doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun.
- Djeuda Tchanga H.B., Tanawa E., Ngnikam E., Tchoungang C. (2001).** *Les nouvelles technologies en assainissement pluvial (Villeurbanne, 25-27 juin 2001),* Pp 151 – 157.
- Ducommun R. (2010).** *Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain.* Thèse de doctorat : Université de Neuchâtel. <https://libra.unine.ch/handle/1234>.
- Ekodeck G.E. (1984).** *L'altération des roches métamorphiques du sud Cameroun et ses aspects géotechniques.* Thèse de Doctorat d'Etat ès Science. National., IRGM. Grenoble –France. Pp. 72-79.
- Emily M. Bowlin., James S. Klaus., Jamie S. Foster., Miriam S. Andres., Lilian Custals., Pamela Reid. (2012).** *Environmental controls on microbial community cycling in modern marine stromatolites. Sedimentary Geology, Volume 263-264, 1 July 2012, pages 45-55.*
- Engaleng. (1978).** *Les modalités de la recherche d'eau dans les roches cristallines fracturées de l'Afrique de l'Ouest N°33-34 Pp 22-30.*
- Feumba R. (2015).** *Hydrogéologie et vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke (Douala, Cameroun).* Thèse de doctorat d'Etat es-Science, Université de Yaoundé I. Pp 150-175.
- Nyeck (1988).** *Organisation et aptitudes culturelles des sols de zoétéélé dans la région forestière humide du Sud-Cameroun. Exemple de deux toposéquences sur granite.* Thèse de doctorat 3^e-cycle Université de Yaoundé I, Pp 201-202.
- Mba F.F., Temgoua E., Dupont kengne P., Natheu Kamhoua S. (2019).** *Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la ville de Dschang, Ouest-Cameroun. International journal of Biological and Chemical Science 13 (5), Pp 39-56.*
- Guasmi I., Kherici H., Bousnoubra., Hdji F. (2010).** *Assessing the organic pollution of surface water of medjerda watershed (NE Algeria). Environmental Earth Sciences. Volume 60, Pp 985-992.*
- G Compaore, P Lachassagne, T Poinet, Y Travi., (1997).** *Evaluation du stock d'eau des alterites : expérimentation sur le site granitique de sanon. IAHS Publications-Series of proceeding and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences 241,37-46.*
- Ewodo Mboudou., Ombolo A., Kouame K., AF Bon., Bineli E. (2015).** *Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères du bassin versant de la Mingosso (région de yaoundé) par les méthodes paramétriques DRASTIC, SI et GOD. International journal of innovation and Applied Studies 12 (1),226-286.*

- Hamza M.H., Added A., Francés A., Rodriguez R., jmi M. et Abdeljaoued S (2008).** Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline – Ras jebel – Raf Raf. (Nord-Est Tunisie) selon les méthodes de paramètre DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau*, Volume 21, N°1, URI : <http://id.erudit.org/iderudit/017932ar>.doi : 10.7202 :017932ar. Pp 75-86.
- Hamza M.H., Ajouté A., Rodriguez R., Abdeljaoued R., Mammou A.B. (2007).** Une réévaluation de la vulnérabilité et de la recharge nette basée sur le SIG dans un aquifère d'une région semi-aride. *Journal de gestion environnementale* 84 (1), Pp 12-19.
- Hamza A., Babiker., Gwiria S., Heather., Riad b., Walliker D. (2005).** Drug resistant plasmodium falciparum in an area of seasonal transmission. Volume 94, Issue 3, Pages 260-268.
- Holzbeierlein., Daniel M.D., Jeffrey P., Villers A., and Stenzl A., (2022).** Improved survival with Enzalutamide in patients with Metastatic Hormone-Sensitive Prostate Cancer. *Journal of clinical Oncology* volume 40, Number 15.
- Jesus Aller., Fernando Bastida., Convadoga Brime., Andrès Perez-Estaun. (1987).** Clivage et sa relation avec le degré métamorphique dans la zone cantabrique (hercynienne du nord-ouest de l'Espagne). Schistosité et sa relation avec le degré de métamorphisme. *Science Géologiques, bulletins et mémoires* 40 (3), 255-272,
- Joseph Mvondo Ondoua., Simon Pierre Mbala Ndzana. (2013).** Evidence of the NE-SW extension in the Sa'a-Monatéle Region as in the Bafia and Yaoundé groups within the central African Foldbelt (Cameroon), implication for the Southern Cameroon Neoproterozoic extension.
- JP Nzenti journal of African Earth Sciences (1998).** Neoproterozoic alkaline metagneous rocks from the Pan-African North Equatorial Fold Belt (Yaoundé, Cameroon) biotites and magnetite rich pyroscenites. *26 (1) 37-47.*
- J Tchakounté., A Eglinger., SF Toteu., Azeh., (2017).** The Adamaoua-yadé domain a piece of archaean crust in the Neoproterozoic central African orogenic belt (Bafia area, Cameroun).
- Kamnaye Madjitoloum. (2013).** Etude de la vulnérabilité des nappes libres à la pollution dans le bassin du Lac –Tchad, cas de Walia à N'Djamena (Sud-Ouest du Tchad). Thèse de Master Université de Dschang. 324P,
- Kamagate B. (2006).** Fonctionnement Hydrologique et origine des écoulements sur le Bassin versant de milieu tropical de socle au Benin. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Montpellier. Pp. 23-30.
- Koum S., Mvondo F., Ntamak M.J., Njom B. (2013).** Surrection relative plio-pléistocène de la surface côtière de la marge Sud du Rio Del Rey (Cameroun) à partir de la géomorphologie quantitative sur le Modèle Numérique de Terrain. *Science technologique* Pp. 59-69.

- Kuete M. (1990).** *Les paléofformes quaternaires du sud Cameroun forestier. Didactiques ORSTOM, Paris, Pp 161-166.*
- Lener JP., Lecourbe V.et al., (1999).** AA., ICP-OES., ICP-MS, *Quelle(s) technique(s) choisir ? 2ème Partie : aspects analytiques. Analyse spectra 2000 28 (206), Pp 23-27.*
- Aller L., Thornhill J. (1987).** *DRASTIC: A standardized system for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. Robert S. Kerr Environmental research laboratory office of research and development U.S Environmental protection Agency. ADA, OKLAHOMA 74820.*
- Li T., Shen H., Yuan Q., Zhang X., Zhang L. (2017).** *Estimation des PM 2,5 au niveau du sol en fusionnant les observations par satellite et en station : une approche d'apprentissage profond géo-intelligente. Lettres de recherche géophysique 44 (23), 11, 985-11,993.*
- Lorienne Thüler. (2014).** *Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. Université de Neuchâtel, Faculté des Sciences.*
- M Larocque., M-C Pharand. (2010).** *Dynamique de l'écoulement souterrain et vulnérabilité d'un aquifère du piémont appalachien (Quebec, Canada). Revue de science de l'eau 23 (1), Pp 73-88.*
- Mangoua M.J., Konan K.L., Kouame K., Zougrou N.N., Kouassi., Savane I. et Biemi J. (2018).** *Évaluation de la vulnérabilité la pollution des eaux souterraines du département de Tiassalé (Sud de la Cote d'Ivoire). EWASH et Ti journal 2018.VOL 2, Issue 2, Pp 46-54.*
- Martin Krismer, An-Min Chen, Martin Steinlechner, Christian Haid, Manfred Lener. (1999).** *Mesure de la rotation vertébrale : comparaison de deux méthodes basées sur des tomodesitogrammes. Chirurgie clinique de la colonne vertébrale 12 (2), Pp 126-130,*
- Melloul A.J., Collin M. (1994).** *The hydrological malaise of the Gaza Strip. Israël journal of Science, vol.43, N°. 2, 105-116 réf. 36.*
- Ngnotué T., Nzenti J.P., Barbey P., Tchoua F.M. (2000).** *Les gneiss de haute teneur de Ntui-Betamba : une extension vers le nord des gneiss panafricains de yaoundé au Cameroun. Journal des Sciences de la Terre en Afrique 31 (2), Pp 369-381.*
- Nathalie Fagnan., (1998).** *Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf. Institut National de la recherche Scientifique 1998.*
- Nzabakurikiza A., Onana V.L., likiby B., Ndome Effoudou Priso., Kamgang Kabeyene V., Ekodeck G.E. (2012).** *Diagnostique de l'unité en géotechnique des graveleux latéritiques sur migmatites de l'Est Cameroun par le biais des méthodes chimico-minéralogiques. Rev. CAMES-série A, 13 (suppl 2) : Pp 28-33.*
- Nzenti J.P., Tchoua F. (1996).** *Les roches à scapolites de la chaîne panafricaine au Cameroun : témoins d'une sédimentation évaporitique d'âge protérozoïque en marge du craton du Congo.*

Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Science de la terre et des planètes, vol 323, Numéro 4, Pp 289- 295.

Nzenti JP., Barbey P., Macaudière., Soba D. (1988). *Origine et évolution des gneiss riches en uranium de Yaoundé (Cameroun). Recherches sur le précambrien 38 (2), Pp 91-109.*

Olivry, (1986). *Fleuves et rivières du Cameroun.*

Patrick Lachassagne., Robert Wyns., Benoît Dewandel. (2011). *La Perméabilité des fractures des aquifères de roche dure n'est due ni au déchargement, mais aux processus d'altération. Terra Nova 23 (3), p 145-161.*

Petr Drahota, Michal Filippi. (2009). *Minéraux secondaires d'arsenic dans l'environnement : une revue. Environnement international 35 (8), 1243-1255*

Paturel J.E., Boubacar I., L'Aour A., Mahé G. (2010). *Analyses de grilles pluviométriques et principaux traits des changements survenus au 20^{ème} siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale. Journal des sciences hydrologiques 55 (8), 1281-1288.*

Paul Bilong., S Eno Belinga., Boris Volkoff. (1992). *Séquence d'évaluation des paysages cuirasses et des sols ferrallitiques en zones forestière tropicales d'Afrique Central : place des sols a horizons d'argiles tachetées. CR Acad. Sci. Paris 312 (II), 109-115,*

Sarah Feuillette. (2001). *Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents : Application à la nappe de Kairouan, Tunisie centrale. Montpellier (FRA) ; Tunis : USTL ; IRD, 344 p. Thèse Doctorat d'Etat : Science de l'eau, 200/ 344 p.*

Segalen L., Renard M., Pickford M., Senut B., Cojan I., Callonnec L., Rognon P. (2002). *Evolution environnementale et climatique du désert de Namib depuis le Miocène moyen : contribution des rapports isotopiques du carbone des coquilles d'œufs de ratites. Comptes rendus. Géoscience, volume 334, N° 12, pp. 917-924.*

Schaffter N., Parriaux A. (2002). *Contamination bactérienne pathogène des eaux dans les bassins versants montagneux. Recherche sur l'eau 36 (1), Pp 131-139.*

Sighommou D., Sigha L. Nkamdjou G., Liéno A., Dezetter G., Mahé., Servat E. (2007). *Impacts des fluctuations climatiques sur le régime des écoulements du fleuve Sanaga au Cameroun, Perspectives pour le 21^{ème} siècle. Climatic and anthropogenic impacts on the variability of water resources, Technical Document in Hydrology, Pp 173-181.*

Steve J. O., Margot J.L., Benner L.A. Giorgini J.D., Daniel S. (2006). *Imagerie radar de l'astéroïde binaire geocroiseur (66391) 1999 KW4. Sciences 314 (5803), 1276-1280.*

Thorntwaite C. W., Wilm E.A., Colman N.O., Cummings A.R., Crot. HT /Gisborne. Harding S.T., Hendrickson A.H., Hoover M.D., Houk I.E., Kittredge J., Lee C.H., Rossby., Saville T., Taylor C.A., (1944). *Eos, Transaction Union géophysique américaine rapport du comité sur la transpiration et l'évapotranspiration volume 25, N° 5. Pp. 683-693.*

- Tabach El., Laurent L., Isam s., Henri., Najjar Y. (2005).** *Estimation de la migration d'une pollution accidentelle dans un projet routier à l'aide des réseaux de neurones artificiels. Revue française de la Géotechnique, Pp 49-57.*
- Tabach E. (2005).** *Etude de l'impact d'une pollution accidentelle et d'une pollution agricole sur les ressources en eau souterraines. Thèse de doctorat en génie civil. Université de Lille 1 Pp 65.*
- Tabué youmbi J.G., (2013).** *Vulnérabilité de la nappe supercielle en zone de socle cristallin urbanisé : cas du bassin versant de la Mingoa à yaoundé au Cameroun. (Ph/D, dissertation) Université de yaoundé 1, Cameroon,223.*
- Tchedele Longollo Yannick., Tchappa Gniamsi Guy Molay., Taypondou Darman Japhet., Sondo Mvele Andre Donald., Abomo Thérèse., Njimbouombouo Mouliom Soualiou., Mambou Ngueyep Luc Leroy. (2022).** *Suitability of soils of Monatélé (Centre Cameroon) in the production of fired compressed earth bricks stratical analysis and modeling of the mechanical behavior.*
- Temgoua E., Ngnikam E., Ndongson B. (2009).** *Qualité de l'eau potable : enjeux de contrôle et d'assainissement dans la ville de Dschang-Cameroun. Vol 3 N° 3.342 X.*
- Temgoua E., Mba F.F., Kengne P.D., Kamhoua S.N. (2019).** *Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la ville de Dschang, Ouest-Cameroun. International journal of Biological and Chimical Sciences 13 (5), Pp 39-56.*
- Thornthwaite C.W. (1948).** *An approach toward a rational classification of climate Geography review volume 38, N°1. Pp 54-94.*
- Tornthwaite C.W., Mather j.R., Wellington W.G., Findlay J.D., Herrington H.F. (1954).** *Le climat et les cultures. Etudes récentes en bioclimatologie : Un groupe, Pp 1-10.*
- V. Murat, D. Paradis, M. M. Savard, M. Nastev, E. Bourque, A. Hamel, R. Lefebvre, R. Martel. (2003).** *Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources naturelles canada, Commission géologique du Canada.*
- Voudouris K., Kazakis N., Polemio M., Kareklas K. (2010).** *Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque à l'aide du modèle DRASTIC et du SIG dans l'aquifère de kiti, Chypre, l'eau européenne. Pp 231.*
- Vrba., Jarolav., Zoporozec., Alexander. (1994).** *Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Pp XXIII-131 ; P.23 cm ; Illustration, Table ; réf : 13 p.*
- UNESCO. (2022).** *Eaux souterraines Rendre Invisible l'invisible. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en 2022. Pp 2-3.*
- Van Schmus W.R., Oliveira E.P., Da Silva A.F., Toteu S.F., Penaye J., Guimaraes I.P. (2008).** *Liens protérozoïques entre la province de Borborema, au nord-est du Brésil, et la ceinture plissée d'Afrique centrale. Société géologique de Londres, publication spéciales 294 (1), 69-99.*

WHO/UNICEF. (2015). *Progrès en matière d'assainissement et d'eau potable. Rapport sur la surveillance de l'approvisionnement en eau. Programme conjoint.*

ANNEXES

Annexe 1 : résultats des suivis piézométriques (valeurs maximales et minimales) effectué respectivement en septembre 2023 et en janvier 2024 sur 40 ouvrages hydrauliques dans la zone d'étude.

QUARTIER	CODE	X(m)	Y(m)	Z(m)	Prof(m)	NS(m)	NP en (m)	NP min
prison	PP1	744533	471892	407	10	7,5	399,5	398,4
prison	PP2	744509	471946	405	8,5	7,6	397,4	396,3
prison	PP3	744491	471963	403	8	7,2	395,8	394,7
sodecao	PP4	744463	471982	401	5	3,8	397,2	396,1
prison	PP5	744409	472028	394	3	0,5	393,5	392,4
prison	PP6	744676	471976	396	6	3	393	391,9
ENIEG	PP7	745720	470883	433	16,8	14,65	418,35	417,25
ENIEG	PP8	745733	471021	429	12,7	12	417	415,9
ENIEG	PP9	745628	470841	429	12,1	11,3	417,7	416,6
ENIEG	PP10	745522	470899	427	12,4	10,2	416,8	415,7
ENIEG	PP11	744491	470815	408	4,7	3,7	404,3	403,2
CENTRE	PP12	744630	470773	397	1,5	1,1	395,9	394,8
CENTRE	PP13	744636	470772	402	3	1,5	400,5	399,4
CENTRE	PP14	744705	470722	400	3,6	2,6	397,4	396,3
NQ	PP15	744943	470618	406	3,2	2,5	403,5	402,4
NQ	PP16	745003	470556	406	3,5	2,6	403,4	402,3
NQ	PP17	745028	470573	405	5,2	4,3	400,7	399,6
NQ	PP18	745107	470609	413	9,45	8,5	404,5	403,4
NQ	PP19	745172	470506	407	4,75	3,5	403,5	402,4
NQ	PP20	745165	470482	408	4,2	1,8	406,2	405,1
NQ	PP21	745209	470492	407	1,5	2	405	403,9
NQ	PP22	745176	470742	421	13,8	13,65	407,35	406,25
NQ	PP23	745239	470758	419	15,2	14,8	404,2	403,1
NQ	PP24	745124	470741	422	16,2	14,4	407,6	406,5
NQ	PP25	745186	470785	423	16	15,5	407,5	406,4
NQ	PP26	745365	470880	423	13	12,4	410,6	409,5
NQ	PP27	745369	470970	423	11	9,9	413,1	412
NQ	PP28	745333	470955	418	10	9,1	408,9	407,8
NQ	PP29	745425	471044	419	9	7	412	410,9
NQ	PP30	745201	470959	422	13,6	13	409	407,9
NQ	PP31	745234	470931	425	13,2	12,8	412,2	411,1
NQ	PP32	745246	471070	421	8,7	8,1	412,9	411,8
NQ	PP33	745256	471125	414	3,6	2,7	411,3	410,2
NQ	PP34	745199	471125	413	5	4	409	407,9
NQ	PP35	745137	471144	414	8,35	7,5	406,5	405,4
NQ	PP36	745132	471163	415	6,4	6	409	407,9

QUARTIER	CODE	X(m)	Y(m)	Z(m)	Prof(m)	NS(m)	NP en (m)	NP min
NQ	PP37	745160	471180	406	6,3	4,5	401,5	400,4
NQ	PP38	745261	471215	402	2,55	1,55	400,45	399,35
AVOH	PP39	745164	471217	402	3	4,5	397,5	396,4
AVOH	PP40	746137	471965	393	1,5	1,9	391,1	390
PEROQUE	PP41	745767	471754	416	13,2	12,3	403,7	402,6
GENDARME	PP42	745037	471424	403	0,9	0	403	401,9
GENDARME	PP43	744959	471393	414	9	8,6	405,4	404,3
GENDARME	PP44	744879	471338	423	17,5	17	406	404,9

Annexe 2 : Cotes des paramètres pour le calcul de l'indice DRASTIC

COTE	D	R	A	S	T	I	C
	Profondeur de la nappe (m) ⁽¹⁾	Recharge (mm/an)	Nature du milieu aquifère (intervalle de cote) ⁽²⁾	Type de sol ⁽³⁾	Pente du terrain (%)	Nature de la zone vadose ⁽⁴⁾ (intervalle de cote) ⁽²⁾	Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/jr)
1	31 et plus	De 0 à 50		Argile	18 et plus	• Couche confinante (1)	0,04 à 4
2	De 23 à 31		• Schiste massif (1-3)	Terre noire			De 4 à 12
3	De 15 à 23	De 50 à 100	• Roches ignées ou métamorphiques (2-5)	Loam argileux	De 12 à 18	• Silt ou argile (2-6) • Schiste (2-5)	
4			• Roches ignées ou métamorphiques altérées (3-5)	Loam silteux		• Roches ignées ou métamorphiques (2-8)	De 12 à 29
5	De 9 à 15		• Till (4-6)	Loam	De 6 à 12		
6		De 100 à 180	• Lits de grès, de calcaire et de schiste (5-9) • Grès massif (4-9) • Calcaire massif (4-9)	Loam sableux		• Calcaire (2-7) • Grès (4-8) • Lits de calcaire, de grès et de schiste (4-8) • Sable et gravier avec silt et argile (4-8)	De 29 à 41
7	De 4,5 à 9			Argile fissurée			
8		De 180 à 250	• Sable et gravier (4-9)	Tourbe		• Sable et gravier (6-9)	De 41 à 82
9	De 1,5 à 4,5	250 et plus	• Basalte (2-10)	Sable	De 2 à 6	• Basalte (2-10)	
10	De 0 à 1,5		• Calcaire karstique (9-10)	Sol mince ou roc ou gravier	De 0 à 2	• Calcaire karstique (8-10)	82 et plus
Poids	5	4	3	2	1	5	3

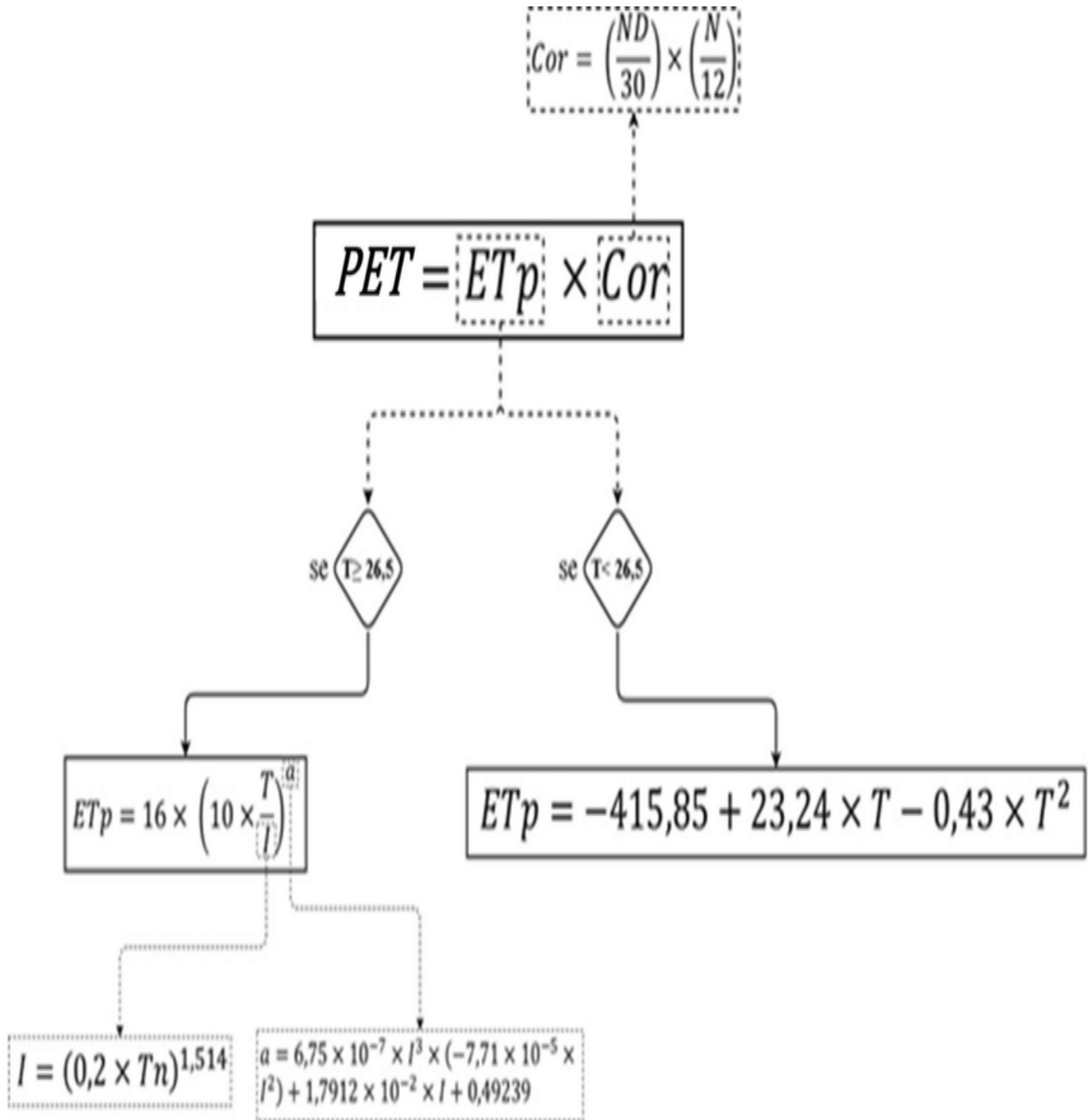
⁽¹⁾ En conditions de nappe captive, la profondeur de la nappe correspond au toit de l'aquifère.

⁽²⁾ Chaque matériau est classé selon la cote type proposée par la méthode DRASTIC. Elle propose aussi un intervalle de cote, indiqué entre () dans ce tableau.

⁽³⁾ Environ le premier mètre de dépôt à partir de la surface du sol.

⁽⁴⁾ Portion souterraine entre le sol et le niveau de la nappe ou entre le sol et le toit de l'aquifère dans le cas d'une nappe captive.

Annexe 3 : Organigramme de Thornwaite



REGION DU CENTRE

DEPARTEMENT DE LA LEKIE

PREFECTURE DE MONATELE

SERVICE DES AFFAIRES SOCIALES ET CULTURELLES



REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

N° 137 /AR/J03/SASC

AUTORISATION DE RECHERCHE

LE PREFET DU DEPARTEMENT DE LA LEKIE soussigné,

Autorise Monsieur ASSE Raphaël, Matricule 15E2255, Etudiant en Master II (filière *Géosciences des Formations Superficielles et Application*) à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, à effectuer du **01 juin au 31 août 2023** des recherches dans l'Arrondissement de Monatélé en vue de préparer son mémoire sur le thème intitulé « *Piézométrie et Vulnérabilité des Aquifères de l'Arrondissement de Monatélé, Région du Centre* ».

Les personnes ressources sollicitées sont invitées de lui apporter toute l'aide nécessaire à la réussite de cette recherche.

En foi de quoi la présente Autorisation de Recherche est établie et délivrée à l'intéressé pour servir et valoir ce que de droit./-

AMPLIATIONS :

- SOUS-PREFET/MTLE
- MAIRE-COMMUNE/MTLE
- UY I-F. S/YDE
- INTERESSE/CHRONO/ARCH

Monatéle, le 30 MAI 2023

LE PREFET,



[Signature]
SIMOU KAMSU Patrick
Administrateur Civil Principal
Hors - Echelle

REGION DU CENTRE
DEPARTEMENT DE LA LEKIE
COMMUNE DE MONATELE
SECRETARIAT GENERAL
SERVICE DES AFFAIRES GENERALES



REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix - Travail - Patrie

Monatéle, le 12 MAI 2023

Réf: V/L du 08/05/2023

N° 150 /L/CM/SG/SAG/05-2023

COMMUNE DE
MONATELE

Le Maire
A
Monsieur ASSE Raphaël.
Tel : 698 20 81 62.
YAOUNDE

Objet: Note d'information sur ~~vos~~ activités
Académiques dans la Commune de Monatéle.

Monsieur,

J'accuse parfaite réception de votre correspondance relativement à vos travaux de recherches académiques dans la Commune dont j'ai la charge.

Y faisant suite et fidèle à notre inclination à la cause de la jeunesse estudiantine, il me plaît de vous signifier par la présente, que la Commune est disposée à vous accompagner dans le cadre de vos travaux.

Veuillez agréer, **Monsieur**, l'assurance de ma parfaite considération. /.



Le Maire,

*Prosper Parfait
Mbassi Bessala*