

Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères du bassin versant de la Mingosso (région de Yaoundé) par les méthodes paramétriques DRASTIC, SI et GOD

[Evaluation of the intrinsic vulnerability of the Mingosso watershed (Yaounde region) by parametric methods DRASTIC, SI and GOD]

G. EWODO MBOUDOU¹⁻², A. OMBOLO¹, J. KOUAME Kan³, A.F. BON¹⁻², and E. BINELI¹

¹Département d'Hydraulique et Maîtrise des Eaux,
Institut Supérieur du Sahel, Université de Maroua,
Maroua, Cameroun

²Département de Sciences de la Terre et de l'univers,
Faculté des sciences, Université de Yaoundé I,
Yaoundé, Cameroun

³UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM),
Université Félix Houphouët-Boigny,
Abidjan, Cote d'ivoire

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The Mingosso watershed is located at periurban zone. It was influenced by high rate of occupation of space by the dwellings. This occupation of space has an impact on the groundwater quality exploited by the wells and the springs. These groundwaters make it possible to make up the deficit due to the lack of the distribution network of water. This water is also threatened by pollution rising from the anthropic activities. In order to protect groundwaters from the Mingosso watershed against pollution, the study on the evaluation of the intrinsic vulnerability in the aquifers of this watershed was carried out by applying methods DRASTIC, SI and GOD coupled with a Geographical Information System. The aim had by this study is to chart the zones likely to be more at the risk of contamination due to an activity coming from the soil surface. Three classes of degree of vulnerability similar to pollution are highlighted by methods DRASTIC, SI and GOD. They are the classes of low, average vulnerability (or moderate) and strong (or significant). The low class of degree vulnerability is most dominant, covering the surfaces respectively of 53,82%; 67,46% and 71,80% for these methods. This low degree vulnerability is due to low permeability, an average infiltration and average slopes. The rate of coincidence of the values of mineralisation of groundwaters with the definite zones of vulnerability is 37%, 18,5% and 25,9% respectively for methods DRASTIC, SI and GOD. Of this rate of coincidence, approach DRASTIC seems to better reflect reality on the ground and could be adequate for the tracing of the vulnerability in the Mingosso watershed.

KEYWORDS: Intrinsic vulnerability, Groundwaters, GIS, Yaounde, Cameroun.

RÉSUMÉ: Le bassin versant de la Mingosso est situé en zone périurbaine influencée par un taux très élevé d'occupation de l'espace par les habitations. Cette occupation de l'espace a un impact sur la qualité de l'eau souterraine exploitée par les puits et les sources. Ces eaux souterraines permettent de combler le déficit dû au manque du réseau de distribution d'eau. Ces eaux sont aussi menacées par la pollution découlant des activités anthropiques. Afin de protéger les eaux souterraines du bassin versant de la Mingosso contre la pollution, l'étude de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans les aquifères de ce bassin a été effectuée en appliquant les méthodes DRASTIC, SI et GOD couplées avec un Système d'Information

Géographique (SIG). L'objectif visé par cette étude est de cartographier les zones susceptibles d'être plus à risque de contamination due à une activité provenant de la surface du sol. Trois classes de degré de vulnérabilité similaire à la pollution sont mises en évidence par les méthodes DRASTIC, SI et GOD. Il s'agit des classes de vulnérabilité faible, moyenne (ou modérée) et forte (ou importante). La classe de degré de vulnérabilité faible est la plus dominante, couvrant les superficies respectivement de 53,82% ; 67,46% et 71,80% pour ces méthodes. Ce degré de vulnérabilité faible est dû à une perméabilité faible, une infiltration moyenne et des pentes moyennes. Le taux de coïncidence des valeurs de minéralisation des eaux souterraines avec les zones de vulnérabilité définies est de 37%, 18,5% et 25,9% respectivement pour les méthodes DRASTIC, SI et GOD. De ce taux de coïncidence, l'approche DRASTIC semble refléter mieux la réalité au sol et pourrait être adéquate pour le traçage de la vulnérabilité dans le bassin versant de la Mingosso.

MOTS-CLEFS: Vulnérabilité intrinsèque, eaux souterraines, SIG, Yaoundé, Cameroun.

1 INTRODUCTION

Les aquifères représentent une importante ressource en eau exploitée pour la consommation humaine et l'utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Dans les zones urbaines et périurbaines d'Afrique subsaharienne, les aquifères de subsurface jouent un rôle d'importance stratégique pour servir d'appoint au réseau de distribution d'eau. Ces aquifères sont souvent menacés par la contamination due aux polluants de différente nature : biologique, chimique ou physique. La prévention contre la pollution de ces aquifères constitue une étape importante à laquelle les études doivent être menées [1], notamment l'étude de la vulnérabilité. La notion de vulnérabilité à la pollution d'un aquifère, est définie comme sa susceptibilité intrinsèque à la modification de la qualité et de la quantité d'eau souterraine dans l'espace et dans le temps. Cette modification peut être causée par des processus naturels et/ou de l'activité anthropique [2], [3], et [4]. Plusieurs techniques ont été développées pour analyser cette vulnérabilité. Des modèles existent sous forme de superposition des couches par index, des processus basés sur la simulation et des approches statistiques. La littérature montre que ces méthodes ont chacune leur limite [1], [5], [6], [7], [8], [9] et [10]. Le bassin versant de la Mingosso (BVM) a été choisi pour étudier cette vulnérabilité de l'aquifère. L'application des méthodes paramétriques DRASTIC, SI et GOD a été celle utilisée. Ces trois méthodes tiennent compte des caractéristiques intrinsèques de l'aquifère en exposant sa prédisposition ou sa vulnérabilité à une pollution liée à une activité provenant de la surface du sol.

2 PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 SITE D'ÉTUDE

Le bassin versant de Mingosso (BVM) couvre une superficie de 3,88 km². Il est situé en zone périurbaine à l'Ouest de la ville de Yaoundé, entre la latitude 3°50' et 3°52'N et entre la longitude 11°27' et 11°30'E. (Fig.1). Le climat qui y règne est de type équatorial chaud et humide, présentant quatre saisons [11]: deux saisons sèches mi-novembre à début mars pour la grande saison sèche et juillet à début août pour la petite saison sèche ; deux saisons pluvieuses de fin mars à juin pour la petite saison pluvieuse et fin août à début novembre pour la grande saison pluvieuse. Les précipitations sont abondantes ($P > 1500$ mm d'eau par an), les températures sont relativement élevées et oscillent entre 22,35°C et 25,68°C le long de l'année. L'humidité relative oscille entre 68,27 à 82,36% et l'évapotranspiration potentielle varie entre 1200 et 1400 mm d'eau par an. L'eau disponible pour l'écoulement souterrain varie entre 290 et 450 mm d'eau par an [12].

2.2 GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

Le socle du bassin versant d'étude est constitué d'un ensemble de roches métasédimentaires composé de gneiss à grenat et disthène, de gneiss à plagioclases et grenat, de micaschistes, de quartzites et des intercalations de marbres et des roches silicatées [13].



Figure 1 : Site d'étude

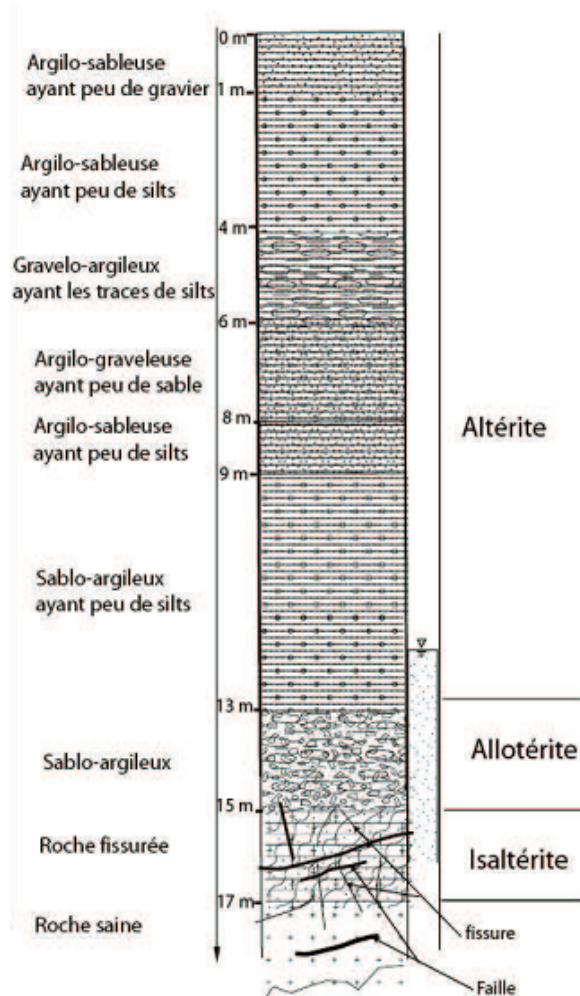


Figure 2 : Profil d'altération de sol dans le bassin versant de la Mingosso

Dans ce bassin d'étude le milieu est discontinu. Les altérites qui surmontent l'aquifère fissuré montrent une granulométrie très variée de la surface vers la profondeur (Fig.2). Les matériaux de ces aquifères superficiels sont essentiellement constitués d'argile sableux ou sable argileux et ont une valeur moyenne de perméabilité intrinsèque de $7,79 \times 10^{-8}$ cm². Cette valeur de la perméabilité intrinsèque met en évidence un milieu anisotrope avec un écoulement laminaire dans les ouvrages de captage [12]. Dans les puits de ce bassin, l'épaisseur de la zone non saturée varie entre 4,06 et 7,45 m au niveau des bas-fonds, entre 0,84 et 15,22 m au niveau du plateau et entre 2,05 et 17,42 m au niveau des zones hautes. Quant aux niveaux piézométriques, ils varient entre 722 et 725 m au niveau des bas-fonds, entre 725 et 749 m au niveau du plateau et entre 750 et 765 m au niveau des zones hautes du bassin. L'amplitude de battement du niveau de la nappe varie le long de l'année entre 0,06 et 1,12 m dans les bas-fonds, entre 0,13 et 5,22 m au niveau du plateau et entre 0,40 et 5,36 m au niveau des zones hautes [12].

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 DONNÉES UTILISÉES

L'évaluation des différents paramètres considérés par les méthodes DRASTIC, SI et GOD nécessitent les données multi sources et leur bonne connaissance. Il s'agit des données géologiques, hydrogéologiques, pédologiques, d'occupation de l'espace, de la topographie, ainsi que de la météorologie. Les travaux effectués dans le BVM par [12] ont fourni des données de points d'ouvrage de captage, de conductivité électrique (CE), de niveaux piézométriques, de profondeurs sol-eau et de laperméabilité verticale. Les informations cartographiques comportant la carte structurale au 1/50000^e fournies par les travaux de [13] ont permis d'obtenir la carte de fracturation. L'image « The Advanced Spaceborne Thermal Emission and

Reflection Radiometer (ASTER) » à résolution 30 m de coordonnées ASTGTM2_N03E011 fournie par le site d'United States Geological Survey (USGS), a été utilisée pour la couverture de la zone d'étude. Son traitement a servi pour déterminer l'indice de développement de persistance du réseau (IDPR), d'établir un modèle numérique d'altitude (MNA) et de ressortir la carte de pente. L'image Google Earth de février 2010 a fourni les informations sur l'occupation de l'espace, le tracé du réseau hydrographique et des zones humides.

Le traitement de toutes ces données s'est effectué avec les logiciels QGIS et GRASS GIS et a permis de constituer la base de données physique de la zone d'étude.

3.2 DEMARCHE D'EVALUATION DE LA VULNERABILITE DE L'AQUIFERE DU BVM

L'appréciation de la vulnérabilité s'est faite à partir de trois méthodes DRASTIC, SI et GOD.

La méthode DRASTIC prend en compte les facteurs hydrogéologiques qui influent sur la vulnérabilité. Il s'agit des propriétés physiques qui jouent un rôle dans la migration et l'atténuation d'un contaminant au sein du complexe sol, zone aérée et aquifère. Sept paramètres sont pris en compte : la profondeur du plan d'eau (D), la recharge efficace annuelle de l'aquifère (R), la lithologie de l'aquifère (A), les types de sol (S), la topographie (T), l'impact de la zone vadose (I) et la conductivité hydraulique de l'aquifère (C).

La méthode SI (susceptibility index ou méthode d'indice de susceptibilité) prend en compte les cinq paramètres suivants : la profondeur de la nappe (D), la recharge efficace de l'aquifère (Re), les types de sol (S), la topographie (T) et l'occupation des sols (OS).

La méthode GOD quant à elle, considère trois paramètres : le type d'aquifère (Ca), la lithologie de la zone vadose (Cf) et la profondeur de la nappe (Cd). Le principe commun de ces méthodes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Ces trois méthodes utilisées, se présentent sous forme de système de cotation numérique basées sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique. Chaque paramètre est subdivisé en intervalle de valeurs significatives.

3.3 DETERMINATION DE LA PROFONDEUR DE L'AQUIFERE

La profondeur de l'aquifère est un facteur important dans l'étude de la vulnérabilité, car toute atténuation du polluant s'opère en relation avec la profondeur. Par exemple, un contaminant traversant une grande épaisseur de la ZNS sera plus absorbée, oxydée ou dégradée au-dessus de la surface libre de l'eau ou rechargée en concentrations ioniques. La profondeur de l'aquifère dans le BVM a été déduite en fonction de la différence entre le potentiel d'élévation de la surface de la terre (Z) et le potentiel d'élévation de surface piézométrique (h) [14]. La profondeur de la surface des eaux souterraines a été calculée en utilisant le calculateur de raster par soustraction du potentiel d'élévation de surface piézométrique (h) converti en format de grille de 10x10 m avec le MNA de la zone d'étude. Les résultats des profondeurs obtenues varient entre moins 1m à plus de 200 m. Pour les méthodes DRASTIC et SI, un recodage et une reclassification ont donné les valeurs allant de 0 à 100 m de profondeur (Tab.1 et 3). La classification de la profondeur suivant la méthode GOD [15] est consignée dans le tableau 4.

3.4 DÉTERMINATION DE LA RECHARGE

Le transport des polluants de la ZNS jusqu'à l'aquifère est produit par la dissolution pendant la recharge en eau. La quantité d'eau qui arrive au niveau de l'aquifère constitue la recharge net, facteur important de la vulnérabilité. Pour l'étude, le facteur recharge est représenté par l'indice de développement et de persistance du réseau (IDPR). Cet IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface [16] et [17]. Très variable, ce paramètre dépend essentiellement de la lithologie de la formation considérée [18]. L'IDPR présente une métrologie de l'écart constaté entre deux réseaux : le réseau théorique et le réseau hydrographique naturel effectivement développé. Le réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs. Il s'établit à partir de l'analyse du modèle numérique de terrain (MNT). L'IDPR a été calculé à partir du logiciel Grass GIS après un prétraitement de MNT de la zone d'étude qui a permis de traiter les dépressions et les zones planes. Le résultat obtenu a été recodé entre 0 et 100 mm et les différentes zones reclassées (Tab.1).

3.5 DÉTERMINATION DU TYPE D'AQUIFÈRE

Le facteur milieu aquifère (A) met en relation la capacité des matériaux aquifères à stocker et à transporter les polluants dans les eaux souterraines pendant l'infiltration dans les couches. Il est basé sur la superposition de la carte structurale et de la carte des différentes zones aquifères. La structurale gouverne l'écoulement d'eau souterraine dont le transfert de polluants. La carte de réseau de linéament et de fracturation du BVM extraite des travaux de [13] a servi pour cette étude. Les différentes zones aquifères ont été déterminées en fonction de la différence entre l'interpolation du potentiel d'élévation de surface piézométrique (h) et celle de profondeur ZNS-niveau d'eau pour le mois d'avril 2005, après avoir converti en format de grille de 10x10 m. Un buffer de 3 m a été affecté aux zones de fracture et la valeur 3 leur a été assigné. Une distinction des surfaces aquifères a été faite. Pour les méthodes DRASTIC et SI, les surfaces correspondant à l'aquifère libre ont été affectées de la valeur de cote 25, celles de l'aquifère semi-libre ont été affectées de la valeur 7, celles de l'aquifère de subsurface et semi captive ont été attribuées les cotes 5 et 3 respectivement (Tab.1 et 3). Pour la méthode GOD, les zones correspondant à l'aquifère libre ont été affectées de la valeur de cote 1. Celles correspondant à l'aquifère semi libre et de subsurface, ont été affectée respectivement des cotes 0,5 et 0,3. L'aquifère semi captive a été affecté de la valeur de cote 0,2 (Tab.4).

3.6 DÉTERMINATION DU PARAMÈTRE SOL ET OCCUPATION DE L'ESPACE

Le sol est une propriété hydraulique qui contrôle la recharge lors du processus d'infiltration des eaux. Les travaux de [12] ont permis de réaliser la cartographie de sol du BVM à partir des résultats de l'analyse granulométrique des différents profils de sondages de sol. La carte de différent affleurement des roches, obtenue à partir de l'image Google Earth de février 2010 par la vectorisation des différentes entités rochersa été combinée avec la carte de sol à une seule carte raster après avoir indexé chaque entité rastérisée à la grille 10x10 m.

Pour la méthode DRASTIC, la valeur de cote 9 a été attribuée aux sables argileux avec un peu de gravier et la valeur 7 aux argiles sableuses avec peu de gravier ou un peu de silt. Les zone d'affleurement de roches gneissiques ont été attribué la valeur de cote 4 (Tab.1).

Pour la méthode GOD, les argiles sableuses avec peu de gravier ou un peu de silt ont été affectées de la valeur de cote 0,6 et les sables argileux avec un peu de gravier ont été affectés de la valeur de cote 0,7. Aux formations gneissique altérées ont été attribuées la valeur de cote 0,7 et celles de gneiss non altérée la valeur de cote 0,8 (Tab.4).

Pour la méthode SI, la zone d'étude étant une zone périurbaine, la vulnérabilité à caractériser est de type classe (III) qui tient compte de la sensibilité de l'habitat et/ou de l'industrie [19]. L'occupation de l'espace s'est basée sur la vectorisation des différentes entités : roche, sol nu, habitation et zone humide. Cette vectorisation s'est faite à partir de l'image Google Earth de février 2010. L'ensemble des entités a été combiné à une seule carte raster après avoir indexé chaque entité rastérisée à la grille 10x10 m. Aux zones d'habitation ont été attribuées la valeur de cote 10. Les valeurs de cote 7 et 6 ont été attribuées aux zones de sol peu épais et épais respectivement. Pour les zones de sol peu hydromorphe et hydromorphe, les valeurs de cote 3 et 2 leur ont été assignées. Les zones de roche affleurant ont été attribuées la valeur de cote 4 (Tab.3).

3.7 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES TOPOGRAPHIQUES

La topographie influence le développement du sol qui a un effet sur l'atténuation des contaminants. Elle résulte de la digitalisation de la pente issue de DEM «Digital Elevation Model» de l'image ASTER à résolution 30 m de coordonnées ASTGTM2_N03E011. Le résultat de la topographie obtenu a été appliqué pour la méthode de DRASTIC et celle de SI. Le résultat obtenu a été reclassé en concordance avec la recommandation de [20] (Tab. 1 et 3).

3.8 DÉTERMINATION DE L'IMPACT DE LA ZONE NON SATURÉE

Les zones d'infiltrations préférentielles représentent le facteur impact. Ces zones jouent un rôle significatif dans le contrôle du transport et d'atténuation des polluants. Elles sont situées au-dessus de surface libre de la nappe. Dans cette zone, biodégradation, neutralisation, filtration mécanique, dispersion et volatilisation sont des processus courants. Pour l'étude, les puits d'eau sont les points présentant les zones d'infiltration préférentielle de polluant dans l'aquifères. Un buffer de 30 m a été affecté à chaque puits recensé [12] et une valeur de cote 30 leur a été attribuée. La zone n'ayant pas de puits s'est vue attribuée la valeur 1 (Tab.1).

3.9 DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

Le transport et le destin des polluants dans le système des eaux souterraines dépendent des possibilités du système de transfert de masses. La distribution spatiale de conductivité hydraulique est un paramètre clé de l'estimation du temps de transport du polluant. La conductivité hydraulique (K) est directement en relation avec la transmissivité (T) à travers les couches aquifères (b). La transmissivité (T) du BVM a été obtenue par la réalisation des essais de pompage [21]. L'épaisseur de l'aquifère a été déterminée en fonction de la différence entre l'interpolation du potentiel d'élévation de surface piézométrique (h) et celle de profondeur ZNS-niveau d'eau pour le mois d'avril 2005, après avoir converti en format de grille de 10x10 m. La carte de la conductivité hydraulique est déduite du rapport (T/b) des cartes de transmissivité et de l'épaisseur de l'aquifère. La carte obtenue a été recodée puis reclassée suivant trois classes de perméabilité (Tab.1).

3.10 ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE DE L'AQUIFERE DU BVM PAR LA METHODE DRASTIC

La méthode DRASTIC est un modèle qui repose sur une analyse spatiale classique. Dans la pratique, chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et affecté d'une cotation numérique croissante, en fonction de son importance dans la vulnérabilité et selon la particularité du milieu. Chacun des sept paramètres de l'acronyme DRASTIC a été subdivisé en classes, indexé des cotes variant de 1 à 10 et attribué un poids numérique comprise entre 1 et 5 en fonction de son degré d'influence (Tab.1). Les valeurs des poids utilisées sont celles de la version standard de la méthode DRASTIC [20] qui correspondent à un degré de vulnérabilité (Tab.1). L'indice de vulnérabilité (Iv) est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$Iv = Dp \times Dc + Rp \times Rc + Ap \times Ac + Sp \times Sc + Tp \times Tc + Ip \times Ic + Cp \times Cc$$

Avec D, R, A, S, T, I, et C les sept paramètres de la méthode DRASTIC,

p le poids du paramètre et c la cote associée.

Cette indice de vulnérabilité mesurée en classe de degré de vulnérabilité représente la mesure de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère du BVM (Tab.2 et Fig 3).

3.11 ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE DE L'AQUIFERE DU BVM PAR LA METHODE SI (SUSCEPTIBILITY INDEX)

La méthode SI prend en considération cinq paramètres. Les cotes correspondantes aux différentes classes des paramètres, dans la méthode DRASTIC, ont été également conservées pour les paramètres similaires (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : Topographie). Le cinquième paramètre est l'occupation des sols (OS). Les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres varient de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Quant aux poids attribués aux paramètres SI, ils varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Tab.3). La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues (Tab. 4).

3.12 ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE DE L'AQUIFERE DU BVM PAR LA METHODE GOD

La méthode GOD a été développée par [15]. Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Elle utilise une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation des couches sus-jacentes à la zone saturée. L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres. Le premier réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (Ca). Le deuxième correspond à la lithologie de l'aquifère (Cl) et le troisième est défini par la profondeur de la nappe (Cp) [22]. Les cotes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à " 1 ". L'Indice GOD (IG) qui permet d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution est obtenu par la multiplication de ces trois paramètres. La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères par la méthode GOD a été faite par le calcul de l'Indice GOD (IG) selon l'équation [22]:

$$IG = Ca \times Cl \times Cd$$

Avec Ca : Type d'aquifère ; Cl : Lithologie de l'aquifère ; Cd : Profondeur de la nappe.

Les différentes plages d'IG obtenues ont été mises en parallèle avec les classes de vulnérabilité. D'une manière générale, les indices GOD obtenus sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême" (Tab.5).

3.13 VALIDATION DES CARTES DE VULNERABILITE

L'évaluation de la vulnérabilité doit répondre à deux questions essentielles : la vulnérabilité donne-t-elle des surfaces considérées valides ou non ? Les valeurs obtenues de surface voisine sont-elles différentes significativement ?

La validation des cartes de vulnérabilité peut se faire seulement après analyse des incertitudes. Le chemin des investigations de ces incertitudes consiste à l'analyse de performance des sensibilités [23] ou en comparant les cartes de vulnérabilité réalisées par plusieurs méthodes dans la même surface [24]. C'est cette seconde approche qui a été utilisée dans le cas de cette étude.

La validité de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les méthodes DRASTIC, SI et GOD, a été testée par les données de la conductivité électrique des eaux souterraines. En effet, plusieurs auteurs [1], [25], [26], [27], [28] et [29]; ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines. Cette activité a été réalisée en établissant une comparaison entre la répartition des conductivités électriques dans les eaux de l'aquifère du BVM et la distribution des classes de vulnérabilité. Elle a porté sur l'analyse de la concentration ionique des eaux souterraines du BVM réalisée sur 54 points d'eau.

4 RÉSULTATS

4.1 NIVEAU DE VULNERABILITE DES AQUIFERES DU BASSIN VERSANT DE LA MINGOSSO SELON DRASTIC

Les valeurs d'indice de vulnérabilité sont respectivement comprises entre 47 et 235. Cinq plages d'indice de vulnérabilité ont été mises en évidence selon la méthode DRASTIC (Tab.7). L'analyse de ces plages a révélé cinq classes de degrés de vulnérabilité à la pollution (Fig.3):

- la classe de vulnérabilité très faible disséminée en îlots dans le bassin d'étude. Elle représente 28,56% de la superficie du bassin. Cette classe illustre les zones de couches non saturées constituées d'argile sableuse, d'épaisseur comprise entre 14 et 20 m, et combiné à une perméabilité moyenne comprise entre $5,10^{-6}$ et $5,10^{-5}$ m/s ;

Tableau 1: Notation des critères de la méthode DRASTIC utilisée

D	R	A	S	T	I	C									
Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation
0-2 (m)	10	Ruissellement majoritaire	0-20 (mm)	9	Aquifère libre	0-1	25	Argilo-sableuse avec un peu de graviers	7	0-2 %	10	Argile sableuse	3	Faible	4
3-9 (m)	7	Ruissellements moyen	21-40 (mm)	8	Aquifère semi libre	2-6	7	Sablo argileux avec un peu de graviers	9	2-6%	9	Sable argileux avec peu de gravier	6	Moyenne	6
10-19 (m)	5	Ruissellement égale à infiltration	41-60 (mm)	6	Aquifère subsurface	7-14	5	Gneiss fissuré	4	6-12%	5	Gneiss altéré	9	Forte	8
20-39 (m)	2	Infiltration moyenne	61-80 (mm)	3	Aquifère semi captive	15-20	3	Gneiss intact	3	12-18%	3	Gneiss sain	10		
>40 (m)	1	Infiltration majoritaire	81-100 (mm)	1	-	-	-			>18%	1				
Poids	5		4		3			2		1		5		3	

Cat : catégorie D : profondeur R : recharge A : aquifère S : texture du sol T : topographie et fracturation I : nature de la zone non saturée C : perméabilité

Tableau 2: Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC [21]

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
< 80	Très faible
80-100	Faible
100-120	Moyenne
120-140	Forte
>140	Très forte

Tableau 3: Notation des critères de la méthode SI utilisée

D	R		A			T		OS			
Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation	Cat	cotation		
0-2 (m)	10	Ruissellement majoritaire	0-20 (mm)	9	Aquifère libre	0-1(m)	25	0-2 %	10	habitation	70
										Sol peu épais	7
3-9 (m)	7	Ruissellements moyen	21-40 (mm)	8	Aquifère semi libre	2-6 (m)	7	2-6%	9	Sol épais	6
10-19 (m)	5	Ruissellement égale à infiltration	41-60 (mm)	6	Aquifère subsurface	7-14 (m)	5	6-12%	5	Sol peu hydromorphe	3
20-39 (m)	2	Infiltration moyenne	61-80 (mm)	3	Aquifère semi captive	15-20 (m)	3	12-18%	3	Sol hydromorphe	2
>40 (m)	1	Infiltration majoritaire	81-100 (mm)	1	-	-	-	>18%	1	Roche affleurante	4
Poids	0,186		0,212		0,259			0,121		0,222	

Cat : catégorie D : profondeur R : recharge A : aquifère T : topographie et fracturation OS : occupation du sol

Tableau 4 : Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI [31].

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

Tableau 5 : Classification de la vulnérabilité de la méthode GOD selon [16]

Type d'aquifère

aquitard	Captive	Semi captive	Sub-surface	Semi libre	libre
0	0,1	0,2	0,3	0,5	1

Type de lithologie

Sol résiduel	Silt et limon	Sable éolien	Sable alluvionnaire	Colluvion et graveleux	Sédiment non consolidé
0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
Sol Meuble argile		sable	Craie		
	Silts volcanique	tuff			Roches poreuses consolidées
0,6	0,7		0,9		
Formation ignées et métamorphique et ancien volcanique		Récents niveaux volcaniques		Calcaire et autres roches	Roches denses consolidées
0,5 à 0,8		0,8 à 0,9	0,9 à 1		

Profondeur de l'eau en (zone captive et libre)

>100 m	50-100 m	20-50 m	10-20 m	5-10 m	2-5 m	<2 m
0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Tableau 6 : Critère d'évaluation de la vulnérabilité Indice de vulnérabilité final selon la méthode GOD [16]

0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Négligeable	Faible		Modéré		forte			Très forte (extrême)		

- la classe à vulnérabilité faible est majoritaire et représente 53,82% de la superficie du bassin. Dans cette zone, le sol est argile sableuse, associé à une perméabilité moyenne de $5,10^{-6}$ et $5,10^{-5}$ m/s. Les niveaux statiques dans cette zone sont généralement compris entre 10 et 14 m ;
- la classe de vulnérabilité moyenne se présente sous forme d'îlots au Nord et au Sud-ouest, disséminée en petite surface au Nord-Est et au Centre. Elle représente 1,86% de la superficie du bassin. Dans cette zone, la couche non saturée est constituée de sable argileux combinée à une perméabilité comprise entre $5,10^{-5}$ et $5,10^{-4}$ m/s. Cette zone est à un niveau statique compris entre 5 et 10 m ;
- la classe de forte vulnérabilité est confinée vers le Nord du bassin et représente 0,01%. Dans cette zone, la couche non saturée est constituée de sable argileux et de faible épaisseur (0-5 m) qui recouvre un socle gneissique fracturé et altéré. Leur perméabilité est forte avec des valeurs de $5,10^{-5}$ et $5,10^{-4}$ m/s ;
- la classe de vulnérabilité très forte se présente à l'Est et sous forme de petite surface éparsée dans le bassin. Elle représente 15,74% de la superficie. Cet indice de très forte vulnérabilité peut être dû aux puits forcés jusqu'à la nappe d'eau souterraine créant ainsi les zones à très forte potentielle de pollution.

4.2 NIVEAU DE VULNERABILITE DES AQUIFERES DU BASSIN VERSANT DE LA MINGOSSO SELON SI

Les résultats révèlent que l'indice de valeur de vulnérabilité varie entre 21 et 105. Quatre plages d'indice de vulnérabilité ont été mises en évidence selon le tableau 7. L'analyse des plages d'indice de vulnérabilité fait ressortir quatre classes de surface de vulnérabilité (Fig. 4) :

- la classe de vulnérabilité faible est disséminée dans tout le bassin et représente une superficie de 67,46%. Elle serait due aux îlots de sol couvert de végétation ou de culture à ruissellement égal à l'infiltration, à des profondeurs de la nappe oscillant entre 14 et 20 m et à des pentes comprise entre 6 et 12% ;
- la classe de vulnérabilité moyenne, aussi disséminée dans le bassin d'étude, représente 28,27% de la superficie. Elle serait due à l'occupation du sol par l'habitat combiné à des profondeurs de la nappe oscillant entre 5 et 10 m, et à des pentes comprises entre 2 et 6% ;
- la classe de vulnérabilité élevée se présente en îlot au Nord, au Sud-ouest, Ouest, au Centre et au Sud. Elle représente 3,98% de la superficie du bassin d'étude. cette vulnérabilité élevée serait due aux îlots de sol peu épais constitué de sable argileux à faible couverture végétale et combiné aux pente faible (2 à 6%) et ruissellement moyenne ;
- la vulnérabilité très forte se présente sous forme d'îlot au Nord et un peu disséminé à des proportions très faibles vers le Sud du bassin. Elle représente 0,29% de la superficie. Elle serait due à de faible profondeur d'aquifère, associée à des infiltrations moyennes, aux sols peu épais à texture sable argileux, et aux zones de très faible pente (0 à 2%).

4.3 NIVEAU DE VULNERABILITE DES AQUIFERES DU BASSIN VERSANT DE LA MINGOSSO SELON GOD

L'indice de vulnérabilité (IG) obtenu varie entre 0,07 et 0,6. Les plages élaborées à partir de l'indice (IG) selon la méthode GOD ont mis en évidence quatre plages de vulnérabilité :

- $IG < 0,1$ (vulnérabilité négligeable) ;
- $0,1 < IG < 0,2$ (vulnérabilité faible) ;
- $0,3 < IG < 0,4$ (vulnérabilité modérée) ;
- $0,4 < IG < 0,6$ (vulnérabilité forte).

Subséquent au calcul de l'indice de vulnérabilité (IG) obtenu qui varie de 0,07 à 0,6, l'analyse de ces plages d'indice de vulnérabilité révèle quatre classes de vulnérabilité (Fig.5). La plage d'indice de vulnérabilité très forte n'est pas représentée dans la zone d'étude et la carte issue est illustrée à la figure 5.

- la classe de vulnérabilité négligeable se rencontre en îlots au Centre, à l'Est et au Sud-Ouest. Elle représente 25,68% de la superficie du bassin versant. Cette classe est presque comparable avec la classe de très faible vulnérabilité de la méthode DRASTIC et serait due à la grande profondeur de la nappe dans ces zones (14 m à 20 m), à la texture argilo-sableuse et à une perméabilité moyenne comprise entre $5,10^{-6}$ et $5,10^{-5}$ m/s ;
- la classe de vulnérabilité faible est la plus importante et occupe 71,8% de la superficie du bassin. Les niveaux piézométriques dans cette zone sont généralement compris entre 10 et 14 m. La nature du sol de la zone non saturée de cette partie est constituée d'argile silteuse sableuse, associée à une perméabilité moyenne de $5,10^{-6}$ et $5,10^{-5}$ m/s ;
- la classe de vulnérabilité modérée se rencontre en petit îlots et parfois disséminés au Nord, au Centre-Sud et au Nord-Est du bassin versant. Elle représente 2,34% de la superficie du bassin. Elle serait due à des niveaux piézométriques compris entre 5 et 10 m, à des zones non saturées constituées de sable argileux combinés à des perméabilités variant entre $5,10^{-5}$ et $5,10^{-4}$ m/s ;

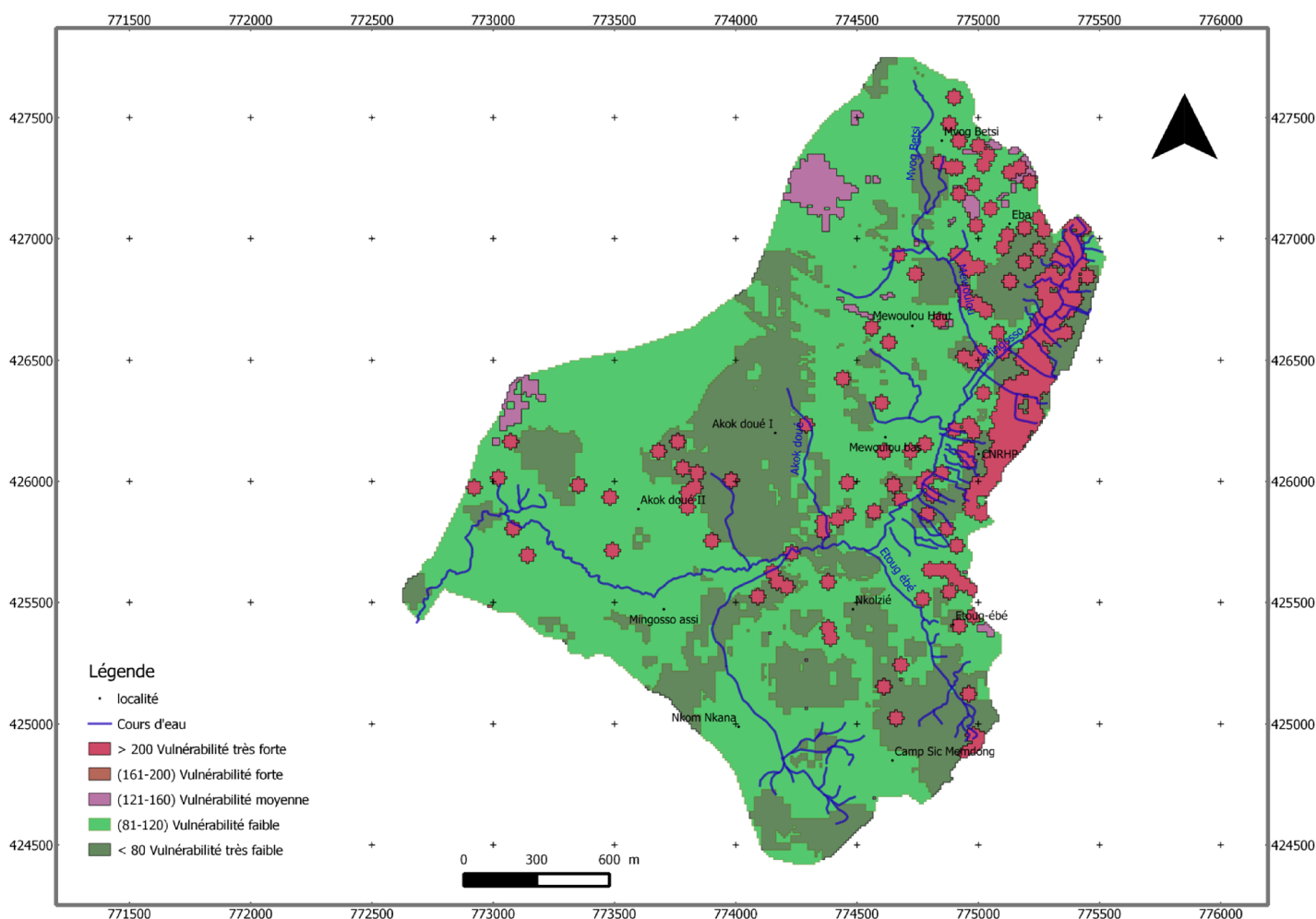


Figure 3: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC

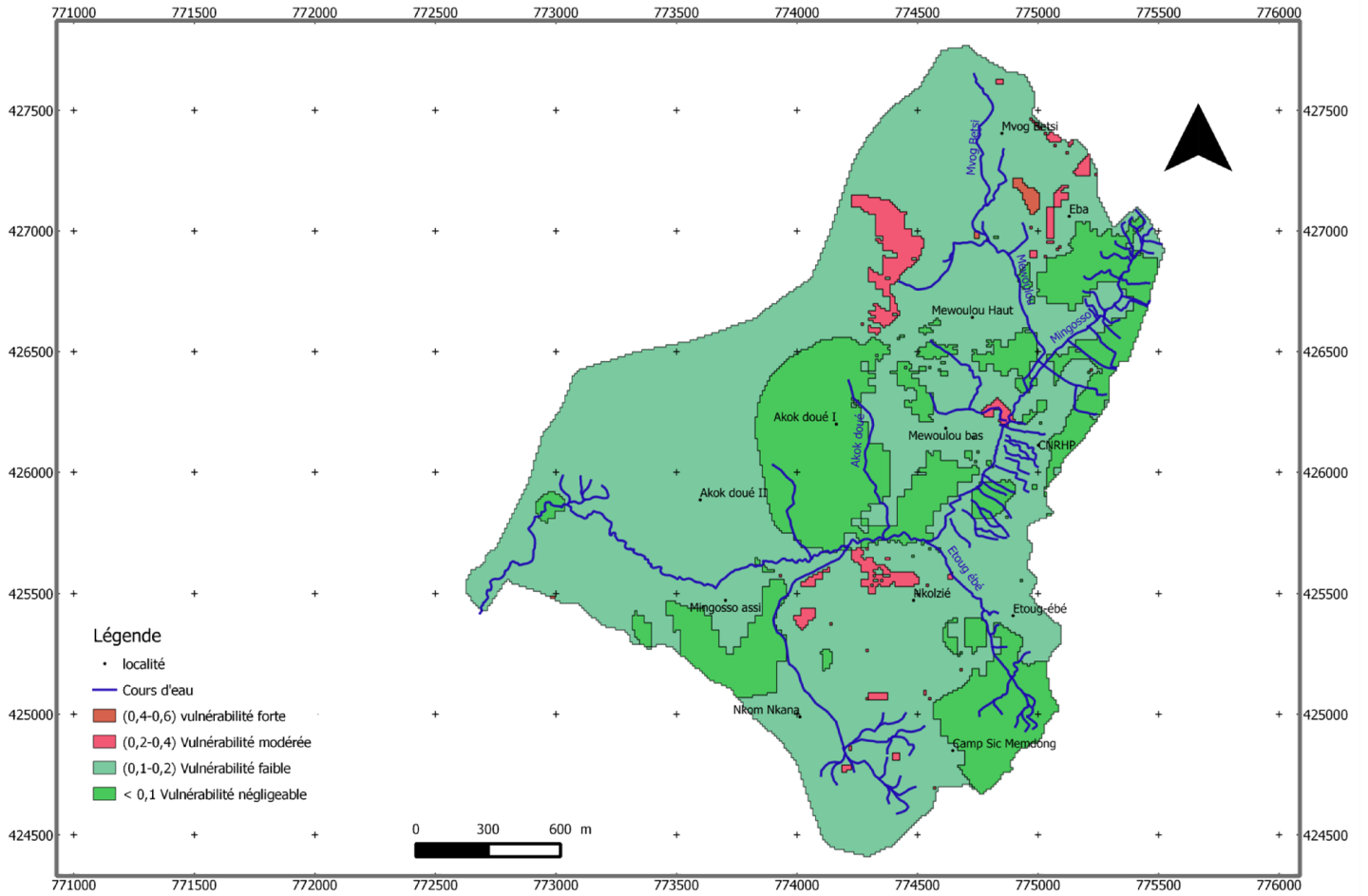


Figure 4: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD

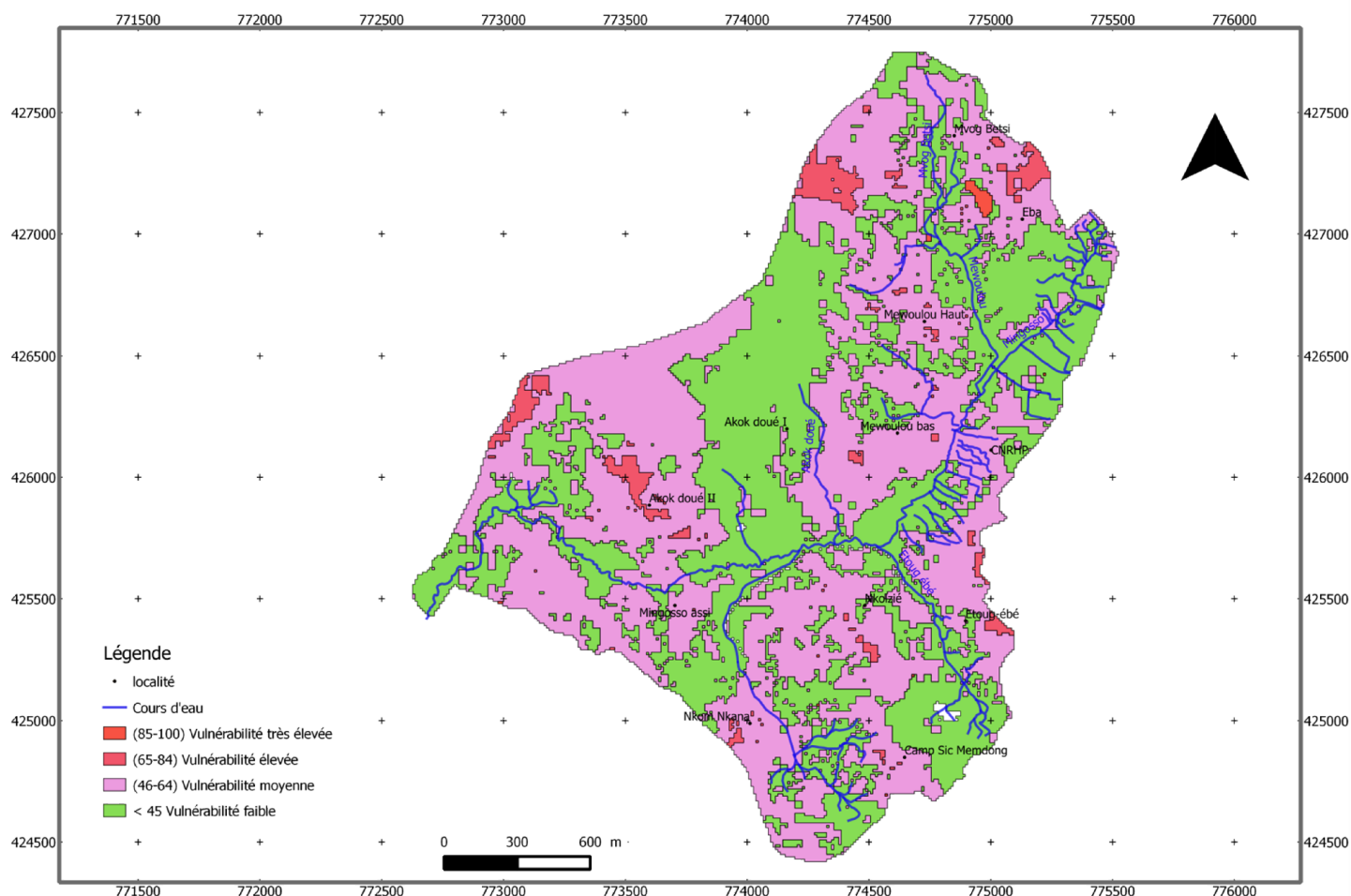


Figure 5: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode SI

- la classe de vulnérabilité forte se rencontre en îlot au Nord du bassin versant et représente une superficie de 0,19%. Cette vulnérabilité forte serait due aux faibles profondeurs de la nappe oscillant entre 0 et 5 m et à la nature du sol de la ZNS constituée de sable argileux recouvrant un socle gneissique fracturé et altéré dans ce secteur.

4.4 VALIDATION DE LA POLLUTION PAR RAPPORT A LA MINERALISATION

Les concentrations ioniques contenues dans les eaux souterraines du BVM varient de 0 à 1000 μ S/cm. Seul trois plages de minéralisation de ces eaux sont observables (Fig.6) : la plage de minéralisation moyenne, de minéralisation faible et de minéralisation très faible.

La zone de minéralisation moyenne couvre le cours d'eau Mewoulou et la zone de Mewoulou haut, le cours d'eau Mingsosso et la zone avale de Nkolzié. Elle couvre aussi, quelques zones éparées d'Akokdoué et la zone de fracture qui sépare Akokdoué I et Akokdoué II. La zone de minéralisation faible représente 75% de la superficie du BVM. La zone de minéralisation très faible se rencontrée dans le Sud (NkomNkana et Camp Sic Mendong), en îlot dans le zone centre nord et au Sud-ouest.

4.5 NIVEAU DE VALIDITE DES CARTES DE VULNERABILITE A LA POLLUTION

4.5.1 POUR LA CARTE DRASTIC

Sur cette carte (Fig.7), 38 valeurs sont comprises entre 0 – 100 μ S/cm, dont neuf (09) soit 24,32% de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité très faible. Vingt et deux (22), soit 57,89% de ces valeurs correspondent avec la zone

de vulnérabilité faible et sept (07) valeurs, soit 18,42% coïncident avec la zone de vulnérabilité importante. Onze points ont des valeurs comprises entre 100 et 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur respectivement dans la zone de vulnérabilité très faible et importante, neuf (09) valeurs dans la zone de vulnérabilité faible. Deux valeurs sont comprises entre 200 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec respectivement une valeur dans la zone de vulnérabilité très faible (50%) et faible (50%). La zone de vulnérabilité importante possède deux valeurs de concentration comprise entre 400 et 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une valeur ayant les concentrations comprises entre 600 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se trouve dans la zone de vulnérabilité importante. En fonction de degré de minéralisation des eaux et des zones de vulnérabilité définies pour une classe, il ressort que, sur cinquante-quatre (54) points de valeurs de conductivité des eaux mesurées, 20 valeurs soit 37% coïncident avec les zones définies par ses minéralisation (Tab.9). Dont, (09) points coïncident avec la classe de vulnérabilité très faible, (09) avec celle de vulnérabilité faible et deux (02) avec la classe de vulnérabilité importante (Tab.9).

Tableau 7 : Pourcentage de surface de vulnérabilité

% surface de degré de vulnérabilité	DRASTIC	SI	GOD
Très faible (ou négligeable)	28,56	-	25,68
Faible	53,82	67,46	71,8
Moyenne (ou modérée)	1,86	28,27	2,34
Forte (ou élevée)	0,01	3,98	0,19
Très forte (ou très élevée)	15,74	0,29	-

Tableau 8 : Pourcentage de surface de minéralisation (ou concentration ionique)

% surface de concentration ionique	DRASTIC	SI	GOD
Très faible (ou négligeable)	2,28	-	12,17
Faible	79,7	92,56	80,91
Moyenne (ou modérée)	3,06	3,29	1,26
Forte (ou élevée)	4,3	3,98	5,66
Très forte (ou très élevée)	10,66	0,17	-

Tableau 9 : Nombre des points de coïncidence de mesure de minéralisation en fonction des zones de vulnérabilité définie par la méthode DRASTIC

Minéralisation	zone de vulnérabilité					Total
	Très faible nombre de points	Faible nombre de points	Moyenne nombre de points	Forte nombre de points	Très forte nombre de points	
Très faible 0-100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	9	22	0	7	0	38
Faible 100-200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	9	0	1	0	11
Moyenne 200-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	1	0	0	0	2
Forte 400-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0	0	0	2	1	3
Très forte 600-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0	0	0	0	0	0

Tableau 10 : Nombre des points de coïncidence de mesure de minéralisation en fonction des zones de vulnérabilité définie par la méthode GOD

Minéralisation	zone de vulnérabilité				Total
	Négligeable	Faible	Modérée	Forte	
	nombre de points	nombre de points	nombre de points	nombre de points	
Très faible 0-100 $\mu\text{S/cm}$	9	27	2	0	38
Faible 100-200 $\mu\text{S/cm}$	6	5	0	0	11
Moyenne 200-400 $\mu\text{S/cm}$	0	2	0	1	3
Forte 400-600 $\mu\text{S/cm}$	0	0	2	0	2
Très Forte 600-1000 $\mu\text{S/cm}$	0	0	0	0	0

Tableau 11 : Nombre des points de coïncidence de mesure de minéralisation en fonction des zones de vulnérabilité définie par la méthode SI

Minéralisation	zone de vulnérabilité				Total
	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée	
	nombre de points	nombre de points	nombre de points	nombre de points	
très faible 0-100 $\mu\text{S/cm}$	9	27	2	0	38
faible 100-200 $\mu\text{S/cm}$	6	5	0	0	11
moyenne 200-400 $\mu\text{S/cm}$	0	2	0	1	3
Importante 400-600 $\mu\text{S/cm}$	0	0	2	0	2
Très forte 600-1000 $\mu\text{S/cm}$	0	0	0	0	0

4.5.2 POUR LA CARTE GOD

Sur cette carte (Fig.8), 38 valeurs sont comprises entre (0 – 100 $\mu\text{S/cm}$), dont cinq (05) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité très faible. Trente-trois (33) de ces valeurs correspondent avec la zone de vulnérabilité faible. Onze (11) points ont des valeurs de concentration comprises entre 100 et 200 $\mu\text{S/cm}$, avec une valeur dans la zone de vulnérabilité négligeable (ou très faible), dix (10) valeurs dans la zone de vulnérabilité faible. Deux points ont des valeurs de concentration sont comprises entre 200 et 400 $\mu\text{S/cm}$ et se trouvent dans la zone de vulnérabilité faible. Il en est de même pour les deux points ayant les valeurs de concentration comprises entre 400 et 600 $\mu\text{S/cm}$. Un seul point de concentration comprise entre 600 et 1000 $\mu\text{S/cm}$ se trouve dans la zone de vulnérabilité faible. En fonction de degré de minéralisation des eaux et des zones définies pour une classe de vulnérabilité, il ressort que 14 points sur cinquante-quatre (54) soit (25,9%) de valeurs de conductivité des eaux mesurées coïncident avec les zones vulnérabilités définies (Tab.10). La classe de vulnérabilité faible est celle qui a un grand nombre de points de différentes classes de minéralisation. Les classes de vulnérabilité modérée et forte ne présentent pas des valeurs de point de minéralisation.

4.5.3 POUR LA CARTE SI

Sur cette carte (Fig.9), 38 valeurs sont comprises entre 0 – 100 $\mu\text{S/cm}$, dont neuf (09) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité faible. Vingt-sept (27), de ces valeurs correspondent avec la zone de vulnérabilité moyenne et deux (02)

de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité forte. Onze (11) valeurs ont des concentrations comprises entre 100-200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec six (06) de ces valeurs qui coïncident avec la zone de vulnérabilité faible et cinq (05) de ces valeurs coïncident avec la zone de vulnérabilité moyenne. Deux valeurs ont des concentrations oscillant entre 200 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et correspondent avec la zone de vulnérabilité moyenne. De même, deux valeurs sont comprises entre 400-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et coïncident avec la zone de vulnérabilité forte. Pour les concentrations comprises entre 600 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ une seule valeur coïncide avec la zone de vulnérabilité moyenne. En fonction de degré de minéralisation des eaux et des zones de vulnérabilité définies pour une classe, il ressort que, dix (10) sur cinquante-quatre (54) points de valeurs de conductivité des eaux mesurées, soit 18,5% de valeurs coïncident avec les zones définies par ses classes de vulnérabilité (Tab.11). La classe de vulnérabilité très forte ne possède des valeurs de points de minéralisation et la zone de vulnérabilité moyenne possède un grand nombre de points des différentes classes de minéralisation.

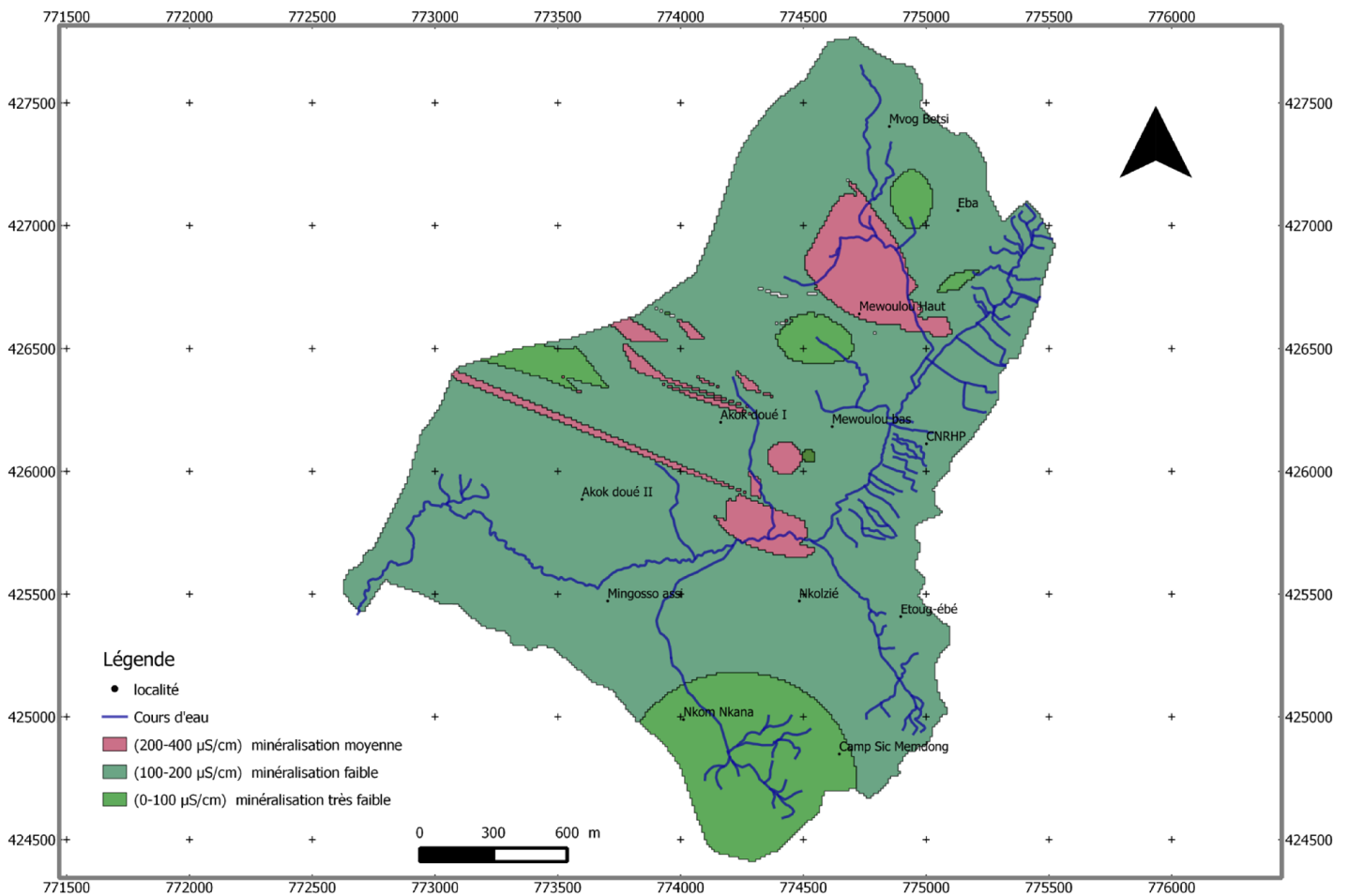


Figure 6 : Carte de minéralisation

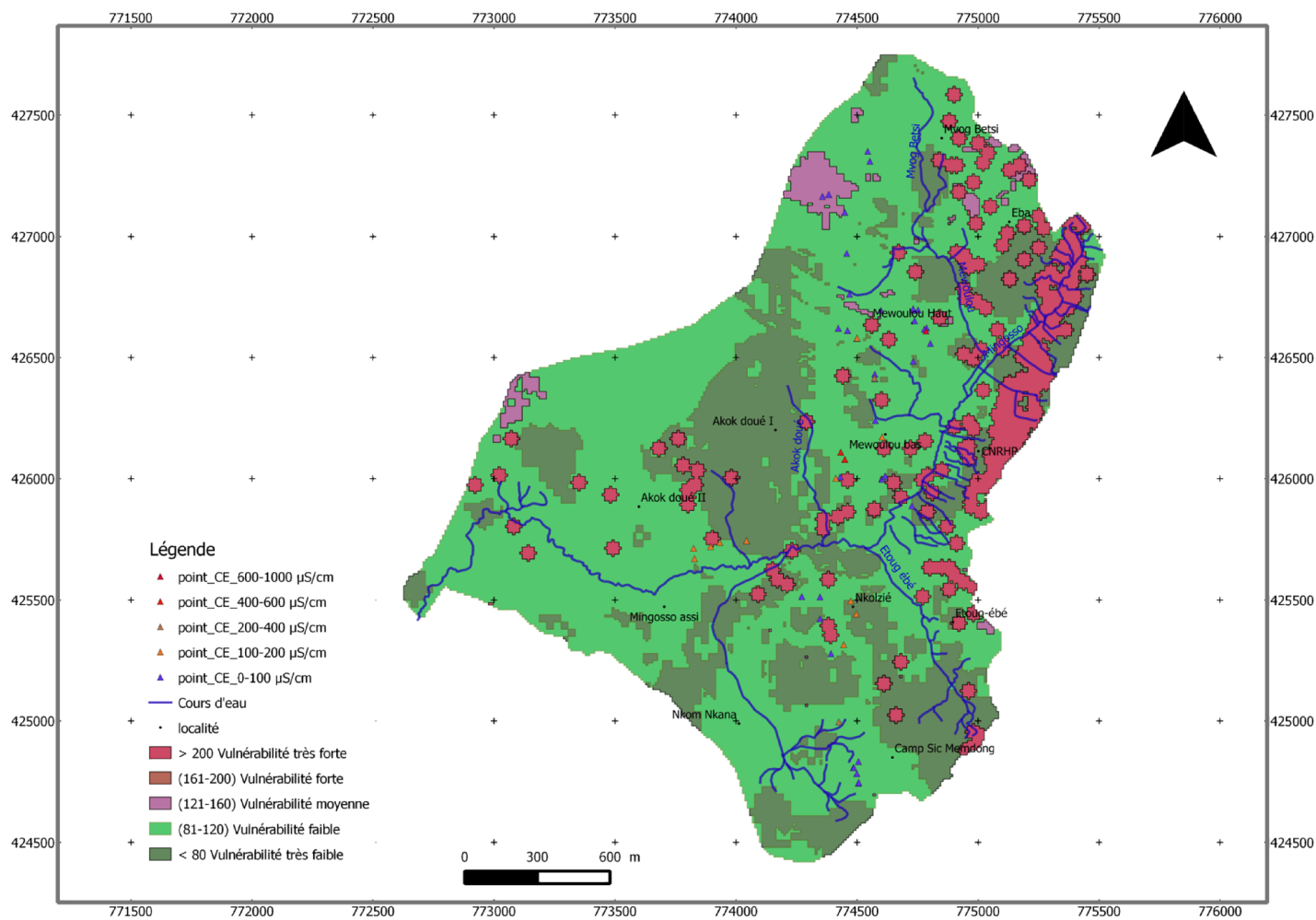


Figure 7: Niveau de validité de la carte de vulnérabilité par la minéralisation, méthode DRASTIC

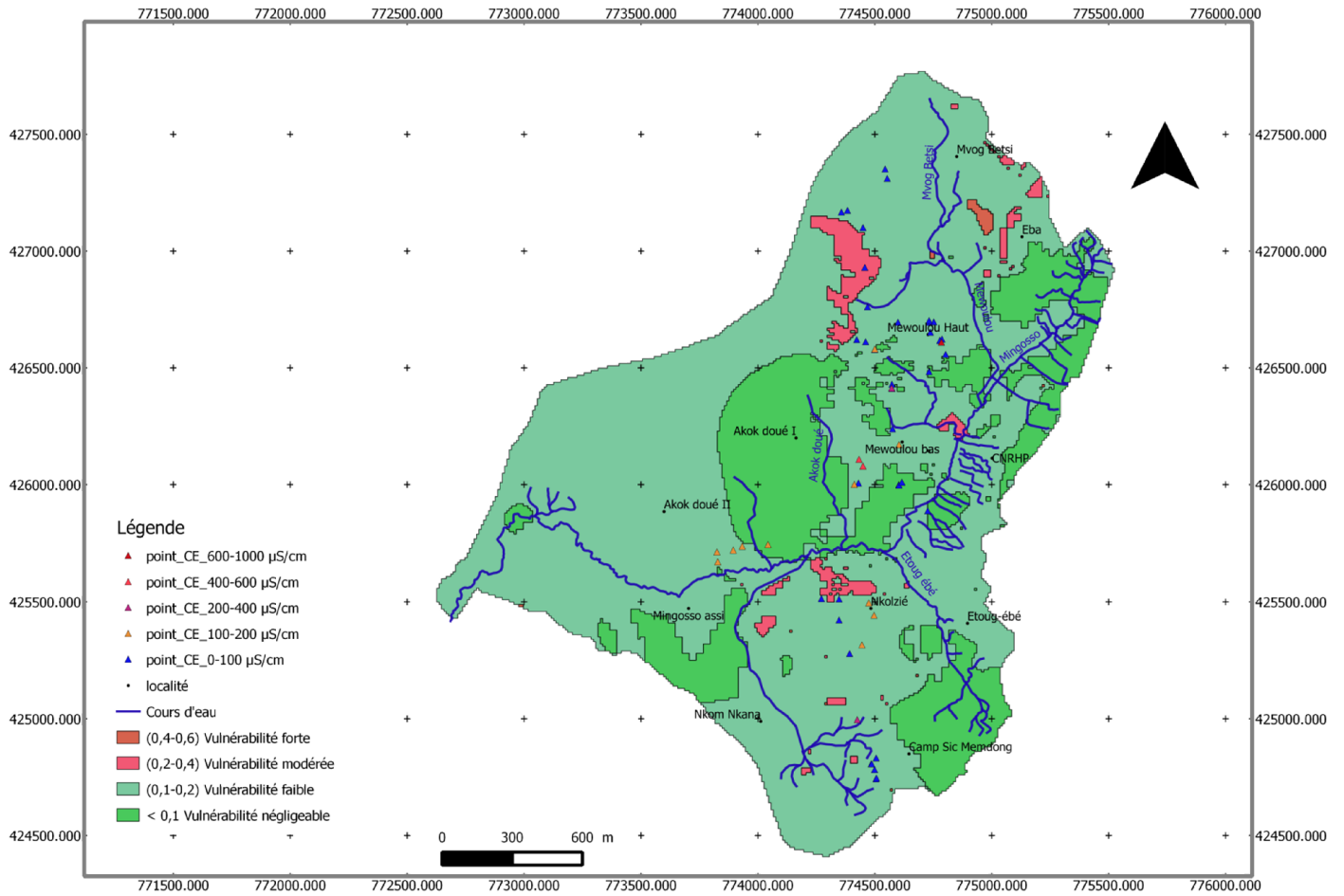


Figure 8: Niveau de validité de la carte de vulnérabilité par la minéralisation, méthode GOD

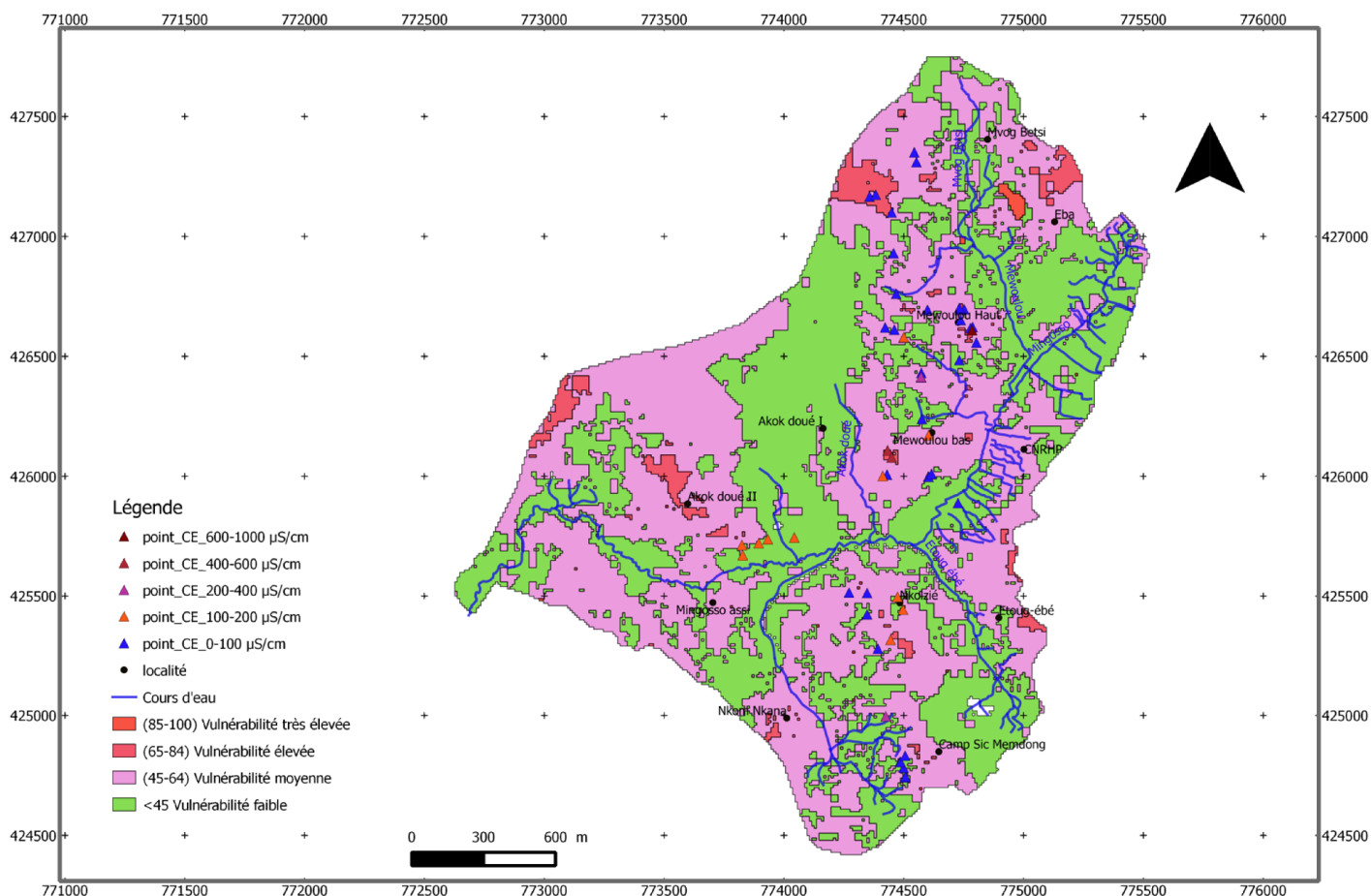


Figure 9: Niveau de validité de la carte de vulnérabilité par la minéralisation, méthode SI

5 DISCUSSION

Cette étude a été réalisée dans un petit bassin défini par les conditions naturelles et les limites hydrogéologiques. La zone est caractérisée par une forte occupation du sol illustrant les zones pouvant être le siège de contamination de par l'activité liée au terrain. La combinaison de trois méthodes d'approche utilisée est importante pour comprendre le mécanisme et la représentativité de la vulnérabilité à la pollution dans le domaine examiné. Ceci permet de distinguer, selon les méthodes, parfois trois ou quatre classes, s'étendant du très faible au degré très élevé de vulnérabilité. La différence dans le nombre de classe est liée au fait que les frontières et les dimensions de classe qui sont assignées à différents paramètres ne sont pas absolues. Ceci implique que les limites de classe standard peuvent ne pas refléter la réalité au sol où une classe peut entourer les unités hydrogéologiques différentes. D'ailleurs, les différents travaux en littérature ont prouvé que les limites varient d'une méthode à l'autre, d'une étude à l'autre ou d'une région à l'autre [1], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [23] et [29]. Par exemple, la méthode GOD ne donne pas assez d'importance pour les paramètres : couche aquifère et recharge. Il ressort que ces méthodes d'étude de la vulnérabilité intrinsèque aident à acquérir une bonne idée de la plupart des zones sensibles et prescrire plus tard des mesures de protection nécessaires [9]. La validation de la carte de vulnérabilité aurait été plus représentative, si les mesures de conductivité électrique en grand nombre et réparties dans tout le BVM avaient été effectuées. L'analyse des polluants dans ce BVM aurait fourni des valeurs supplémentaires pour la validation. Un bon nombre des paramètres utilisés comme la recharge, zone d'impact ou occupation de sol et topographie sont approximatives ou produits par extrapolation en graduation différente. Ceux derniers peuvent expliquer des erreurs pendant le processus d'évaluation lors de la validation utilisant les valeurs de conductivité électrique observées des eaux souterraines. Car ces valeurs ne seront que fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles [28]. On note ainsi cinq classes de vulnérabilité pour la méthode DRASTIC contre 4 classes pour les deux autres. La différence entre les classes suivant les méthodes se situe à l'absence de la classe de très faible vulnérabilité dans le cas de la méthode SI et l'absence de la classe

vulnérabilité élevée dans le cas de la méthode GOD. Trois classes de vulnérabilité similaire à la pollution sont discernées par la méthode DRASTIC, SI et GOD. Il s'agit des classes de vulnérabilité faible, moyenne (ou modérée) et forte (ou importante). La classe de degré de vulnérabilité faible est la plus dominante, couvrant les superficies respectivement 53,82% ; 67,46% et 71,80% pour les méthodes de DRASTIC, SI et GOD. Cette classe est répartie sur l'ensemble du BVM et l'épaisseur de la ZNS dans ces zones varie entre 10 et 14 m. Elle a une texture argile sableuse. Cette classe possède une perméabilité faible, une infiltration moyenne et les pentes moyennes. Le taux de coïncidence des valeurs de minéralisation des eaux souterraines avec les zones de vulnérabilité définies est de 37%, 18,5% et 25,9% respectivement pour les méthodes DRASTIC, SI et GOD. Il ressort de ces différents taux de coïncidence que l'approche DRASTIC offre le plus grand pourcentage de taux de coïncidence et présente aussi un grand nombre de classe de vulnérabilité par rapport aux deux autres méthodes. Ce fort taux de coïncidence de l'approche DRASTIC a été aussi relevé par [9] dans la région de Bonoua en Côte d'Ivoire, [30] dans la région de Jijel, au Nord Est de l'Algérie. Cette approche DRASTIC semble refléter mieux la réalité au sol et pourrait être adéquate pour le traçage de la vulnérabilité dans le BVM.

6 CONCLUSION

La vulnérabilité intrinsèque des aquifères du BVM, déterminée par les méthodes DRASTIC, SI et GOD, révèle une tendance à la vulnérabilité faible avec un taux de coïncidence de valeurs de conductivités électriques élevées dans les classes de degré de vulnérabilité. Néanmoins, on note une forte évolution dans le domaine de vulnérabilité moyenne, forte et très forte dans les lieux foncés pour capter l'aquifère. Ce qui prouve que les aquifères sont menacés localement par la pollution. D'une manière générale, cette tendance à la vulnérabilité faible est suivie par celle de vulnérabilité moyenne, ce qui permet de dire que les aquifères du BVM sont susceptibles d'être menacés localement par l'infiltration des polluants. Il est donc souhaitable de contrôler le fonçage des puits et de faire le suivi des paramètres de pollution, afin de caractériser la sensibilité de l'aquifère de ce bassin. Car cette vulnérabilité peut évoluer par les effets conjugués de l'homme et des années pluviales.

REMERCIEMENT

La collecte des données hydrauliques et le suivi hydrodynamique ont pu se réaliser grâce au soutien de « International Foundation for Science (IFS) » dans le cadre de l'attribution de la bourse Réf : **W/4856-1**. Nous tenons à remercier l'IFS pour leurs supports financiers et matériels. Nous remercions aussi la **CUD** et nos formateurs de Stage (SIG) de l'**IGEAT** de l'**ULB** Belgique.

REFERENCES

- [1] M.H. Hamza, A. Added, R. Rodriguez, S. Abdeljaoued, A. Ben Mammou "A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-RafRaf aquifer, Northern Tunisia)". *J. Environ. Manage.*, 84, 12-19, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.004>
- [2] M. Civita : *La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento : Teoria e pratica*. PITAGORA (Éditeurs), Bologna, Italie, 1994.
- [3] I. S.Babiker, M. A. A. Mohamed, T.Hiyama, Kato, "A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigaharaheigts Gifu Prefecture, central Japan". *SCI Total Environ* vol. 345, pp.127-140, 2005.
- [4] A. Jamrah, A. Al-Futaisi, N.Rajmohan, S. Al-Yaroubi, "Assesment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. *Environ MonotAssess*vol.147, pp. 125-138, 2008.
- [5] R.Zhang, J. D.Hamerlinck, S. P.Gloss, L.Munn, "Determination of non point-source pollution using GIS and numerical models" *J Environ Qual*vol.25, pp. 411-418, 1996.
- [6] A. J.Tesoriero, E. L. Inkpen, F. D. Voss, "Assessing ground-water vulnerability using logistic regression" *Proceedings for the Source Water Assessment and Protection98 Conference, Dallas, Vol.TX*, pp.157-165, 1998.
- [7] S. S. D. Foster, "Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers: a critical overview" in Robins, N.S. (Ed.), *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability Geological Society, London, Special Publications*, vol.130, pp. 7-22, 2002.
- [8] M. N.Almasri, "Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine" *J. Environ Manage* vol. 88, pp. 577-593, 2008.
- [9] G.E.Aké, K. Dongo. H.K.Boyossoro, B.Dibi, M.B. Sale, J. Biemi, "Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrate dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la côte d'Ivoire)". *European Journal of scientific Research*. Vol.31 N°1, pp.157-171, 2009.

- [10] R. Kaur and K. G. Rosi "Ground Water Vulnerability Assessment –Challenges and Opportunities" [Online]. Available: [http://www.cgwb.gov.in/documents/papers/incidpapers/Paper%2012-%20R.%20Accessed\(12 May2011\)](http://www.cgwb.gov.in/documents/papers/incidpapers/Paper%2012-%20R.%20Accessed(12%20May2011))
- [11] J.B. Suchel, "Les climats du Cameroun". *Thèse Univ. Saint-Étienne*, 1988.
- [12] G. Ewodo Mboudou, "Caractérisation et fonctionnement des aquifères de sub-surface en zone de socle cristallin et de climat intertropical humide : cas des bassins versants de la Mingsosso et de l'Abiérgué (Région de Yaoundé –Cameroun" Univ. Ydé I, Thèse d'Hydrogéologie, 2012.
- [13] H. Mvondo, S. Owona, J. Mvondo Ondo and J. Essono, "Tectonic evolution of the Yaounde segment of the Neoproterozoic Central Orogenic Belt in southern Cameroun", *Can. J. Earth Sci.*, 44, 433-444, 2007.
- [14] D. Sanz, S. Castaño, E. Cassiraga, A. Sahuquillo, J.J. Gómez-Alday, S. Peña, A. Calera "Modeling aquifer river interactions under the influence of groundwater abstractions in the Mancha Oriental System" *Hydrogeol J.* doi:10.1007/s10040-010-0694-x, 2010
- [15] S. S. D. Foster, "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy-Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, RIVM" TNO Committee on Hydrogeological Research, pp. 69-86, 1987.
- [16] S. Bézèlguet et E. Des Garets, "Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1- Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité", Rapport BRGM-51783-FR, 41 p. 2002.
- [17] V. Mardhel, S. Pinson et A. Gravier, "Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais". Rapport BRGM/RP-54238-FR. 113p, 2005.
- [18] B. Delcaillau, "Les fronts de chaîne active - Genèse des reliefs et relations tectonique -érosion-sédimentation", Thèse, Univ. de Caen, 300 p, 1997.
- [19] L. Ribeiro, "Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação", Nota interna, (não publicada), ERSHA-CVRM, 8 p, 2000.
- [20] L. Aller, T. Bennet, J.H. Lehr, R.J. Petty et G. Hackett, "DRASTIC : A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings" US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 p. 1987.
- [21] G. Ewodo Mboudou, A. Ombolo, A. Fouépé Takounjou, A. F. Bon, G. E. Ekodeck "Etude des Paramètres hydrauliques des aquifères de sub-surface du bassin versant de la Mingsosso, région de Yaoundé", *Rév. CAMES-Série A*, Vol. 13, pp 123-127, 2012.
- [22] V. Murat, D. Paradis, M. M. Savard, M. Nastev, E. Bourque, A. Hamel, R. Lefebvre, R. Martel, "Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec : Evaluation par les méthodes DRASTIC et GOD", Ressources naturelles Canada, Commission Géologique, p. 16, 2003.
- [23] R.C. Gogu, "Advances in ground water protection strategy using vulnerability mapping and hydrogeological GIS database", Ph.D. thesis. Univ. of Liège. Belgium. 153p. 2000.
- [24] R. C. Gogu, A. Pandele, A. Lonta, C. Lonescu. "Ground water vulnerability analysis using a low geographical information system". MIS/UDMS conference. Well-GIS workshop's Environmental information system for regional and Municipal planning. Prague, pp 35-49, 1996.
- [25] D. Isabel, P. Gelinat et F. Aubre, "Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec", *Rev. Sc. Tech. Eau*, 23p. 1990.
- [26] L. Champagne et R.P. Chapuis, "Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC", *Rev. Sc. Tech. Eau*, Vol. 26, pp. 76 -169, 1993.
- [27] R. M. Mohamed, "Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC", *Sciences et changement planétaires / sécheresse*, vol. 12, n°2, pp. 95-101, 2001.
- [28] J. P. Jourda, M. B. Saley, E. V. Djaoua, K. J. Kouamé, J. Biémi et M. Razack, "Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation", *Revue de Télédétection*. Vol. 5, n°4, pp. 339-357, 2006.
- [29] K. J. Kouamé, "Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution", *Thèse Unique de Doctorat. Université de Cocody, UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières*, 250p. 2007.
- [30] A. Boufekane et O. Saighi, "Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria)", DOI: 10.5897/AJEST2013.1428 Vol. 7(10), pp. 949-960, 2013.