



HAL
open science

Répartition spatiale de la pollution des eaux agricoles d'un bassin versant de deux districts d'Antananarivo (Madagascar)

Nelly Ghislaine Rakoto, Narindra Serraly Andrianaivomanana, Hanta Tahina
Nasimiharintsoa, Wilson Adolphe Rajerison, Alphonse Rafenomanantsoa,
Rolland Rasolofoniaina

► To cite this version:

Nelly Ghislaine Rakoto, Narindra Serraly Andrianaivomanana, Hanta Tahina Nasimiharintsoa, Wilson Adolphe Rajerison, Alphonse Rafenomanantsoa, et al.. Répartition spatiale de la pollution des eaux agricoles d'un bassin versant de deux districts d'Antananarivo (Madagascar). *Environnement, Ingénierie & Développement*, A paraître. hal-03371145v1

HAL Id: hal-03371145

<https://hal.science/hal-03371145v1>

Submitted on 8 Oct 2021 (v1), last revised 17 Mar 2023 (v4)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Titre : Répartition spatiale de la pollution des eaux agricoles d'un bassin versant de deux districts d'Antananarivo
(Madagascar)**

Auteurs : ^{1,2}*RAKOTO Nelly Ghislaine, ¹ANDRIANAIVOMANANA Narindra Serraly, ¹NASIMIHARINTSOA Hanta Tahina, ²RAJERISON Wilson, ²RAFENOMANTSOA Alphonse, ²RASOLOFONIAINA Rolland

¹ : Laboratoire de Chimie de l'Environnement, Mention Procédés et Écologie Industrielle, Domaine Sciences et Technologies, Université d'Antananarivo Madagascar

² : Ecole Doctorale : Valorisation des Ressources Naturelles Renouvelables (VRNR) – Domaine Sciences et Technologies – Université d'Antananarivo Madagascar

*Auteur correspondant : RAKOTO Nelly Ghislaine, rakotonelly@yahoo.fr

Résumé :

Contexte : L'analyse spatiale de la pollution diffuse a été réalisée sur les eaux de la zone agricole située dans un bas-fond d'un bassin versant de Tana 2 et Tana 4 – Madagascar. **Objectif** : Elle vise à déterminer la nature des eaux agricoles et la répartition spatiale des pollutions alcaline, saline et organique. **Méthodes** : La zone agricole a été subdivisée en trois parcelles P1, P2 et P3 selon le type de sol. Des échantillons d'eaux prélevés sur des 43 points géo référencés de cette zone ont été soumis aux mesures de pH, Conductivité Électrique (CE) et Demande Chimique en Oxygène (DCO). La distribution spatiale de la pollution a été établie par interpolation des valeurs de ces indicateurs en utilisant v.kriging du logiciel GRASS GIS. **Résultats et discussion** : Les eaux des parcelles P2 présentent une forte alcalinité. Celles de la parcelle P3 sont très riches en sels dissous et en matières organiques. La distribution spatiale des pollutions alcaline et saline suit un modèle linéaire avec une distance maximale de 856 m. Tandis qu'un modèle exponentiel caractérise la répartition de la pollution organique avec une portée de 514 m. Les eaux issues des pairs de points ayant une distance supérieure à ces valeurs n'ont aucune interaction.

Mots clés : Spatialisation, Krigeage, pollution, eaux agricoles, bassin versant

Abstract:

Context: Spatial analysis of diffused pollution was carried out on agricultural water from lowland of watershed in Tana 2 and Tana 4 - Madagascar. **Purpose**: It aims to determine agricultural water quality and spatial distribution of alkaline, saline and organic pollutions. **Methods**: The agricultural zone was subdivided into three plots P1, P2 and P3 according to soil type. Water sample taken from 43 georeferenced points were intended for pH, Electrical Conductivity (CE) and Chemical Oxygen Demand (DCO) analysis. The spatial distribution was established by interpolating those indicator values using v.kriging from GRASS GIS software. **Results and discussion**: Water from P2 plot have high alkalinity. Those from P3

plots are very rich in dissolved salt and organic matter. The spatial distribution of alkaline and saline pollutions follows a linear model with maximum distance of 856 m. While an exponential mode characterizes the distribution of organic pollution with 514 m of range. The water form pair of points having a distance greater than these values have no interaction.

Keywords: Spatialization, kriging, pollution, agricultural water, watershed

1 1. Introduction

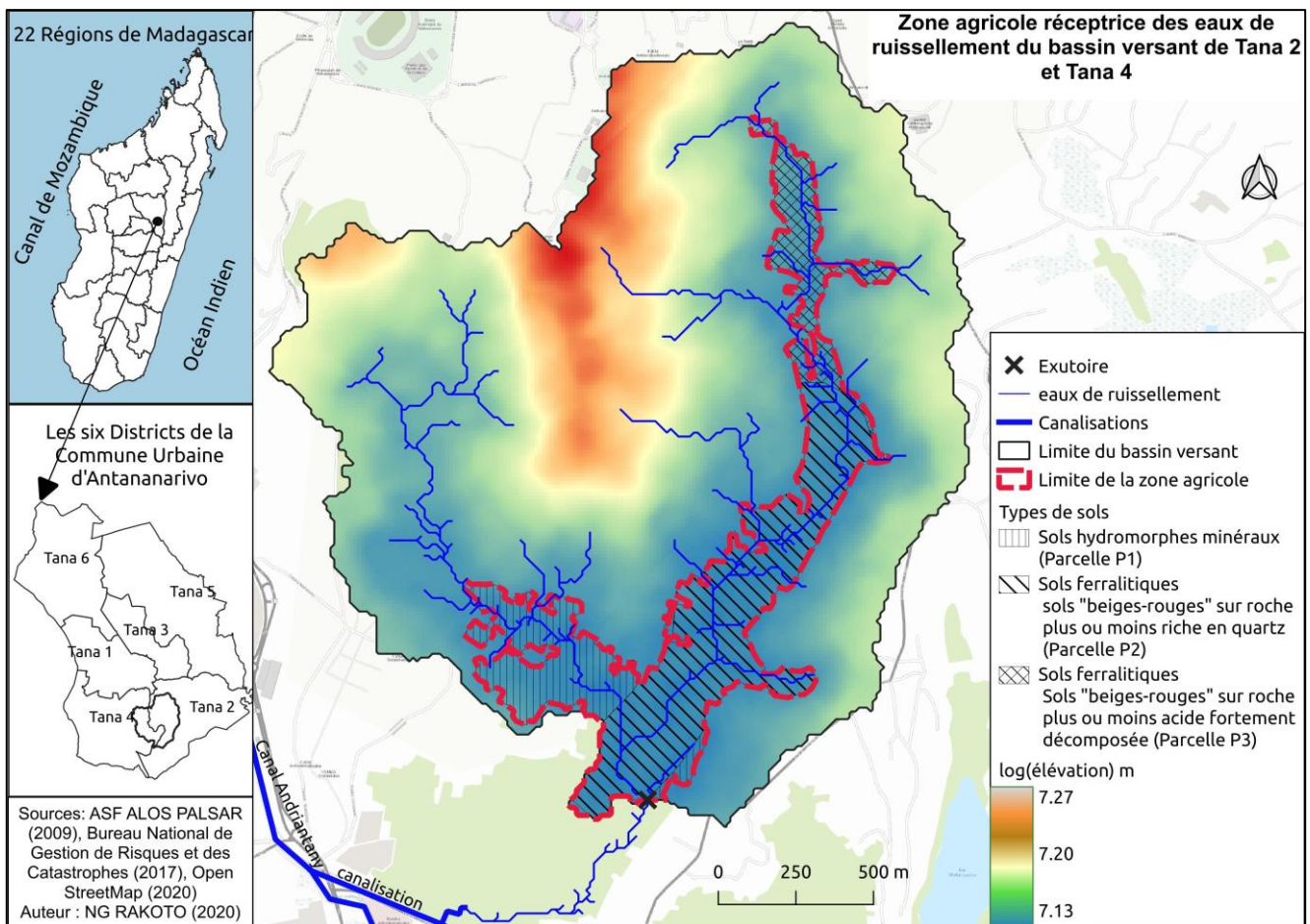
2 L'agriculture urbaine assure à la fois des fonctions alimentaire, économique et environnementale. Pratiquée en ville ou en
3 périphérie, elle sert à approvisionner les citoyens en nourriture (Aubry 2013). Elle génère de revenus directs ou
4 supplémentaires pour les agriculteurs. Elle protège la ville contre l'inondation et permet de recycler les eaux résiduaires
5 urbaines, une pratique courante dans les pays du sud (Drechsel et al. 2011). Bien aménagée, elle offre un paysage vert au
6 milieu de l'agglomération urbaine.

7 L'agriculture d'Antananarivo, ville tropicale d'altitude (1250-1400 m), est actuellement confrontée aux problèmes liés à la
8 pression foncière, à l'industrialisation et à la pollution. Le remblai de terrain permet aux industrielles de développer leurs
9 activités aux détriments de l'agriculture. Souhaitant s'approcher de la ville ou d'y rester, certaines personnes continuent à
10 construire des habitations sur des terrains potentiellement inondables. Ces pratiques réduisent ainsi la disponibilité des
11 terrains agricoles. Par ailleurs, les polluants organiques et salins contenus dans les effluents liquides urbains contribuent à
12 la fertilisation du sol tandis que la qualité de produits agricoles devient de plus en plus inquiétante.

13 Cette étude s'intéresse à la pollution diffuse des eaux agricoles du bas-fond d'un grand bassin versant longeant les
14 districts de Tana 2 et Tana 4 Madagascar (figure 1). La zone agricole considérée est occupée par la riziculture et la
15 cressiculture réalisées soit en monoculture soit en rotation. Elle a été choisie par l'importance de la surface cultivée en
16 intra-urbain d'environ 0,61 km², par sa localisation géographique en intra-muros et par sa qualité de l'eau plus ou moins
17 suspecte. Cette zone reçoit les eaux de ruissellement et les effluents urbains provenant des habitations et d'autres
18 activités polluantes sur les collines surtout durant la période crue. Ils véhiculent des polluants entre autres sels dissous et
19 matières organiques (Dabat et al. 2010)□□□. Ces situations ont soulevé la question suivante : Comment se répartit la
20 pollution des eaux dans la zone agricole du bassin versant de Tana 2 et de Tana 4?

21 L'importance de l'altération des eaux agricoles en milieu urbain, exprimées par le pH, la conductivité électrique (CE) et la
22 Demande Chimique en Oxygène (DCO), dépend principalement des facteurs de pollution. Cette dernière est à la fois
23 d'origine naturelle et anthropique ; Le sol est un fournisseur d'éléments minéraux via la dégradation des éléments
24 constitutifs des roches mères, via les échanges d'éléments minéraux entre les eaux de surface et le complexe adsorbant
25 et via la minéralisation des matières organique de la litière (Eba et al. 2017)□. La nature lithologique altère l'hydrologie
26 du bassin versant soit par érosion mécanique soit par dissolution chimique (Di-giovanni et al. 1999, Wu et al. 2016)□□.
27 Le premier mécanisme enrichie les eaux courantes en entités particulières tandis que la dissolution chimique apporte les
28 éléments dissous tels que le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, le chlore, la silice, le sulfate et l'acide
29 carbonique provenant du sol. Ces derniers contribuent à l'augmentation de la conductivité électrique et à la salinité des

30 eaux. Le passage des affluents sur des formations volcaniques (granites), métamorphique (calcaire, schistes) augmente
 31 leur teneur en éléments majeurs (Ca, Mg, Mn, Na), en silicates (SiO_2) et en traceur de pollution comme le Chlore (Haury
 32 et al. 1996, Négrel 1997, Laraque et al. 2013)□. Les acides humiques et fulviques issus de l'humification et minéralisation
 33 des matières organiques brutes de la litière enrichissent les eaux courantes (Laraque et al. 2013)□. Les activités
 34 humaines et l'agriculture sont les origines anthropiques des polluants des eaux de surface. L'importance de la production
 35 de déchets par les ménages, les activités industrielles et commerciales sont fonctions du nombre de la population. Un
 36 degré élevé de la pollution urbaine est associée à une densité de population élevée (Sofia et Houria 2011)□. L'expression
 37 de la DCO, indicateur de la pollution organique, est habituellement convertie en $\text{g.hab}^{-1}.\text{j}^{-1}$. Les ménages et les commerces
 38 génèrent une importante quantité de déchets solides et liquides : eaux vannes, eaux de lavage et de cuisines. Ces
 39 dernières contribuent à l'augmentation de la quantité de matières organiques et d'éléments minéraux à travers les ions
 40 tensioactifs des détergents des eaux de surface et à leur changement de pH (Gendreau et al. 1983)□. La pratique
 41 agricole, à travers l'utilisation des fertilisants organiques et minéraux comme compost, chaux, dolomies et urée, constitue
 42 une source de substances basiques, de matières organiques et d'éléments minéraux pour les eaux courantes (Laraque et
 43 al. 2013, Haury et al. 1996)□.



44

45 **Figure 1 : Zone agricole étudiée réceptrice des eaux de ruissellement du bassin versant de Tana 2 et Tana 4**

46 Ce travail vise principalement à réaliser une analyse spatiale simple de la pollution diffuse des eaux agricoles urbaines
47 d'Antananarivo afin d'élaborer des cartes informatives destinées aux consommateurs, aux chercheurs, aux citoyens et
48 surtout aux autorités. Les objectifs spécifiques sont de déterminer les caractéristiques des eaux agricoles et de
49 déterminer la répartition spatiale de pollutions alcaline, saline et organique.

50 **2. Matériels et Méthodes**

51 **2.1. Échantillonnages**

52 Le sol constitue une source naturelle d'éléments minéraux et de matières organiques des eaux de surface. Ainsi pour
53 mettre en évidence l'importance de la pollution anthropique, la zone agricole étudiée a été subdivisée en trois parties
54 selon les types de sol (figure 1) : la parcelle P1 constituée par des sols hydromorphes minéraux à gley ou pseudogley
55 indifférenciés. La parcelle P2 est formée par un sol ferralitique « beige-rouge » sur roches plus ou moins riches en quartz
56 tandis que la parcelle P3 est un sol ferralitique « beige-rouge » sur roche plus ou moins acide fortement décomposé. Les
57 propriétés physico-chimiques de ces sols sont fournies dans le tableau 1. Les parcelles P1 caractérisé par des sols
58 hydromorphes, sont plus riches en matières organiques et plus pauvres en éléments minéraux que les sols ferralitiques
59 de P2 et P3.

60 Des échantillons d'eau ont été prélevés sur 43 points de la zone agricole dont 15 points (EA_P1) issus de la parcelle P1, 18
61 points (EA_P2) y compris l'exutoire issus de la parcelle P2 et 10 points (EA_P3) issus de la parcelle P3 (figure 2). Ces
62 points, choisis aléatoirement, ont été géo référencés à l'aide d'un GPS GARMIN ETREX 10 de 3 à 5 m de précision avec un
63 système de coordonnées WGS 84 EPSG 4326. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyse de pH et CE. La détermination de
64 la DCO a été réalisée sur trois échantillons d'eau de chaque parcelle avec des valeurs élevées de pH et CE.

65 **2.2. Analyse des eaux agricoles**

66 Le pH indicateur d'alcalinité ($\text{pH} > 7$) ou d'acidité ($\text{pH} < 7$) des eaux est équivalent à la concentration en ion hydrogène de la
67 solution. Il a été mesuré à l'aide d'un pHmètre « pHM-210 Meterlab Radiometer Analytical » avec une précision de l'ordre
68 de $\pm 0,01$. La Conductivité Électrique (CE en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) mesure la quantité d'ions, proportionnelle à la quantité de sels
69 dissous, présents dans les eaux de surface. Elle a été déterminée à l'aide d'un conductimètre HANNA avec une précision
70 de $\pm 0,02 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. La Demande Chimique en Oxygène (DCO en $\text{mg d'oxygène} \cdot \text{l}^{-1}$) est en relation avec la quantité de
71 matières organiques contenues dans les eaux. Ce paramètre a été mesuré à 440 nm à l'aide d'un spectrophotomètre V-
72 1200. La méthode consiste à déterminer l'excès de bichromate de potassium qui n'a pas réagi avec les composés

73 organiques présents dans l'eau. La DCO correspond à la quantité d'oxygène équivalent à celle du bichromate consommé
 74 par ces matières.

75

Types de sols		P1	P2	P3
Classification	Classe	Hydromorphe	Ferrallitique	Ferrallitique
	Sous classe	Minéraux	Fortement dessaturé	Fortement dessaturé
	Groupe	-	Rajeuni	Rajeuni
	Sous-groupe	Sols à gley ou pseudogley indifférenciés		
	Famille	-	Roches plus ou moins riches en quartz	Roches plus ou moins acides profondément décomposés
	Couleur	-	Beige rouge	Beige rouge
Propriétés physico-chimiques	Taux de saturation (%)	15 – 20	15 – 28	< 20
	pH		5.5	4.8 – 5.7
	Matière Organique (%)	8 – 10	0.75	-
	C/N	10 – 12	-	-
	Remarque	Engorgé d'eau	Présence des éléments minéraux à la surface	-

76 **Tableau 1:** Types et caractéristiques physicochimiques des sols des bassins versants étudiés (Sources : Bourgeat 1968,
 77 Aubert et Segalen 1965) □

78 L'Organisation internationale pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a recommandé un pH compris entre 6,5 et 8,4 et
 79 n'impose aucune restriction pour les CE inférieurs à $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour les eaux d'irrigation (FAO, 2003) □. Or, selon le
 80 décret n° 2003/464 du 15/04/03 promulgué par le Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts Malagasy, l'intervalle

81 de pH acceptable est compris entre 6,5 et 9 et les valeurs limites de la CE et de la DCO sont respectivement de 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
82 et 150 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Ministère de l'Environnement des Eaux et Forêts Malagasy, 2003)□.

83 2.3. Analyse de la variabilité spatiale de la pollution des eaux

84 L'interpolation spatiale consiste à déterminer la répartition de la pollution sur chaque partie de la zone agricole. Elle
85 permet de prédire en tout point de l'espace des valeurs non échantillonnées (pH, CE et DCO) à partir des échantillons
86 voisins. Elle a été réalisée en deux dimensions selon un variogramme omnidirectionnel γ (qui ne dépend que de la
87 distance) équivalent à une fonction d'une variable aléatoire grâce à l'outil v.kriging du logiciel libre GRASS.

88 Ce variogramme obtenu lors du lancement de l'algorithme v.kriging est défini comme étant la demie moyenne des écarts
89 au carré des paramètres pH, CE et DCO entre tous les points pris deux à deux selon la relation (1). Il correspond à une
90 version binarisée des nuages de points pour lesquels on a calculé l'écart type des paramètres pH, CE et DCO. La variabilité
91 spatiale est représentative lorsque la valeur absolue du kurtosis, paramètre d'estimation des valeurs aberrantes présentes
92 dans la distribution, soit inférieur à 3 (Chen et al. 2012)□.

$$\gamma(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{2N(\Delta x, \Delta y)} \cdot \sum_{i,j \in S(\Delta x, \Delta y)} (z_i - z_j)^2 \quad (1)$$

93

94 où γ : variogramme qui est fonction de la distance entre les paires de points

95 $N(\Delta x, \Delta y)$: nombre de paires de points

96 z_i et z_j : valeur de la variable considéré (pH, CE ou DCO) sur le point d'échantillonnage i et j

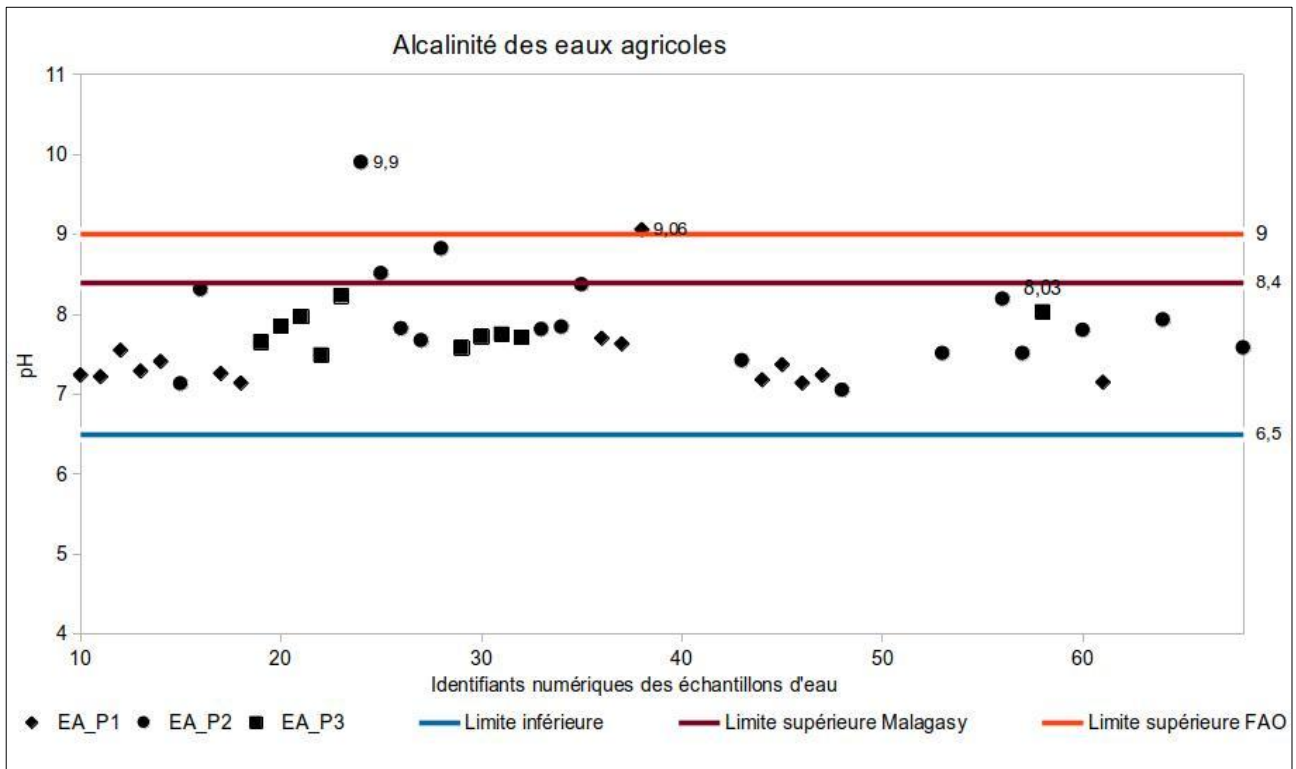
97 $S(\Delta x, \Delta y)$: ensemble de tous les paires de points tel que

98 $S(\Delta x, \Delta y) = \{(i, j) \mid (\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}) \simeq (\Delta x, \Delta y)\}$

99 3. Résultats et discussions

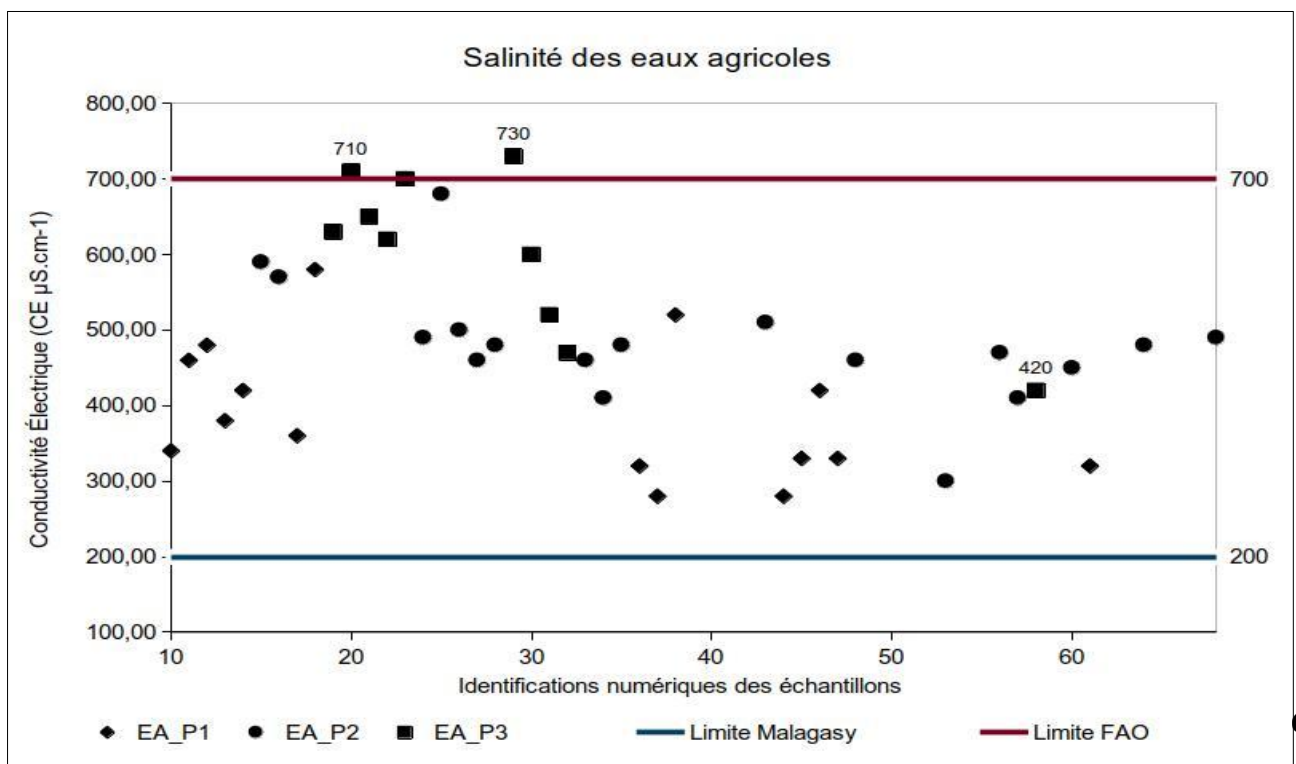
100 3.1. Caractéristiques des eaux agricoles

101 Les échantillons d'eaux agricoles sont généralement basiques, riches en éléments minéraux et légèrement pollués en
 102 matière organique. Ils sont caractérisés par des pH allant de 7,05 à 9,9 (EA_P2). Les valeurs extrêmes de la conductivité



103 électrique sont de $280 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $730 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, supérieures à la norme des effluents urbains ($200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) Malagasy
 104 (Figures 2, 3 et 4). Ainsi l'évacuation de ces eaux usées dans le milieu naturel est interdite. Toutefois, la FAO n'affecte
 105 aucune restriction en termes d'utilisation en agriculture à une eau dont la conductivité électrique est inférieure à $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.
 106 La DCO des eaux agricoles varie de $114 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ à $248 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, seul un échantillon d'eaux issues de la parcelle P1
 107 respecte la norme malgache des eaux usées ($150 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

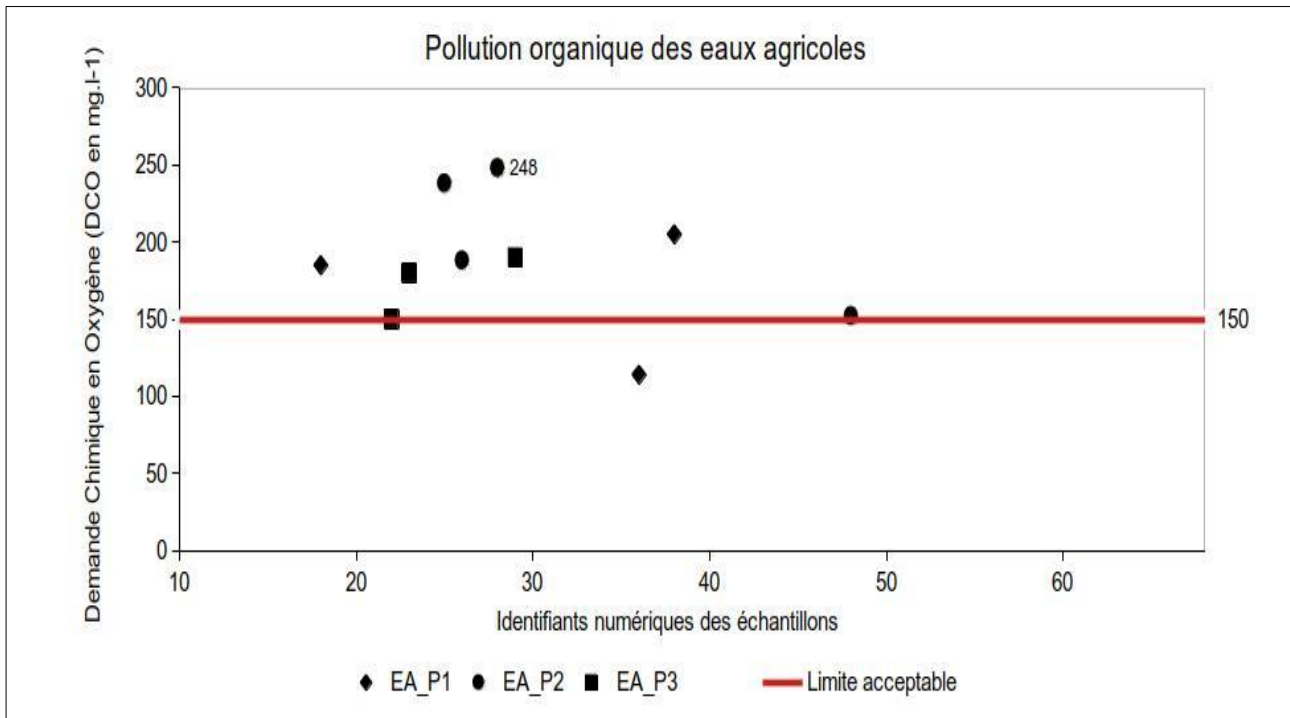
108 Figure 2 : Alcalinité des eaux agricoles



109

Figure 3 : Salinité des eaux agricoles

110



111

Figure 4 : Pollution organique des eaux agricoles

112

EA_P1, EA_P2 et EA_P3: échantillons d'eau prélevés dans les parcelles 1, 2, 3

113

3.2. Distribution spatiale de la pollution

114

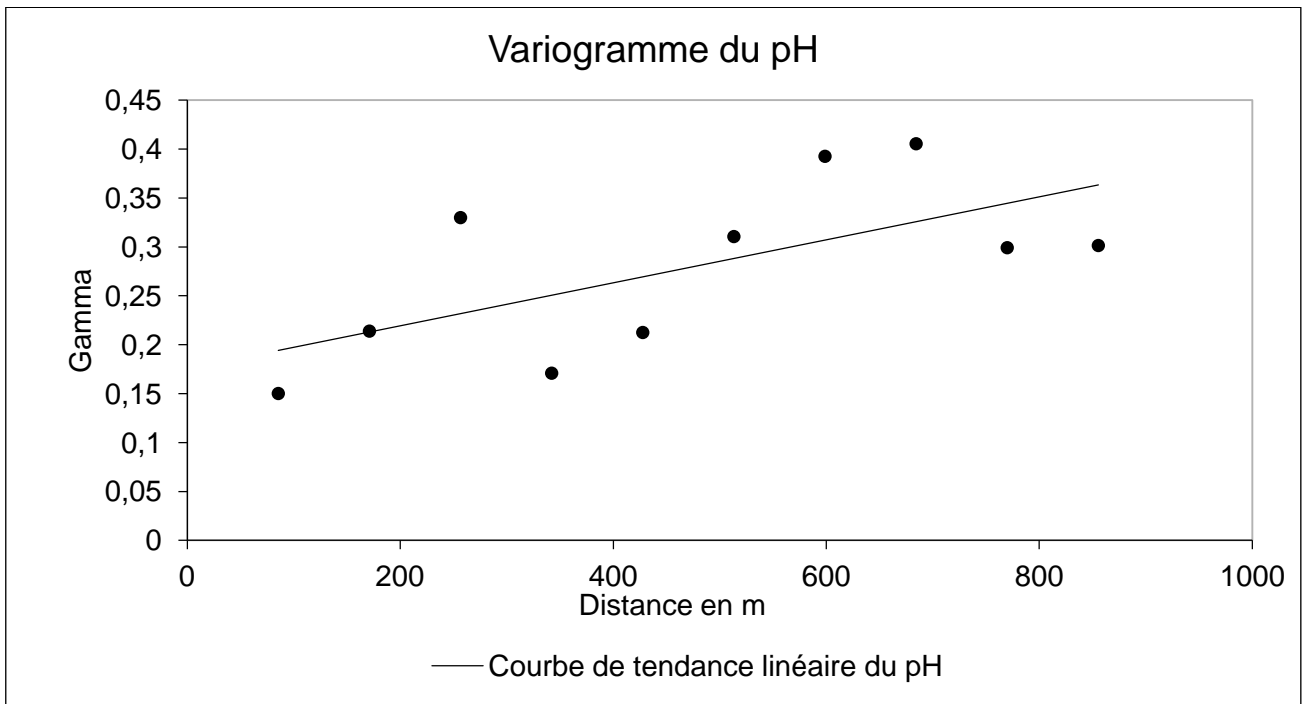
Deux types de modèles de distribution spatiale ont été observés selon les variogrammes expérimentaux du pH, de la CE et de la DCO (figures 5, 6 et 7). Si les variogrammes de pH et CE présentent un modèle linéaire avec un kurtosis respectif de 3,1 et 0,6 ; celui de la DCO suit une allure exponentielle avec un kurtosis égale à 0,3 (tableau 2). Ces valeurs montrent la régularité des modèles. Pour tous les paramètres, l'algorithme considère par défaut une distance maximale de 856 m et une portée égale à 514 m pour le variogramme de la DCO. La portée correspond à la distance au-delà de laquelle la valeur du paramètre et la distance entre les paires de points sont statistiquement indépendants. Au-delà de ces valeurs les paires de points d'échantillonnages d'eau n'ont aucune interaction.

121

La partie Nord de la zone agricole (P3) est la plus sujette à la pollution alcaline, saline et organique des eaux (figures 8,9 et 10). Comme P2 et P3 sont formés par des sols ferrallitiques, l'importance des valeurs des indicateurs de pollution enregistrées dans P3 provient des activités anthropiques : agricultures, rejets d'eaux usées des ménages, et commerces. Mais la pollution n'atteint pas l'exutoire du bassin versant. L'écoulement des eaux sur un lit alluvionnaire calcique et leur stagnation contribuent à leur alcalinisation (Nisbet et Verneaux 1970, Bouchard 1983). Un pH supérieur à 9 favorise la mortalité des espèces aquatiques ; En Afrique tropicale, la salinité des eaux de ruissellement d'un bassin versant et

126

127 alimentant un fleuve varie de $35 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et $1200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; Les valeurs élevées en CE et en DCO proviennent de l'effet de
128 l'érosion qui draine les particules solides comme le Fe, le Mn, le SO_4^{2-} , les matières organiques solides ou en suspensions
129 rejetées par les ménages et les activités anthropiques du bassin versant (Attingli et al. 2016)□. La distribution spatiale de
130 la pollution est également associée au phénomène de propagation des eaux qui est un mouvement tridimensionnel
131 regroupant ruissellement et infiltration : le premier processus est un phénomène de surface qui favorise le transport des
132 polluants vers les eaux de surface tandis que le second est à l'origine de la pollution de la nappe souterraine.



133
134

Figure 5 : Variogramme du pH

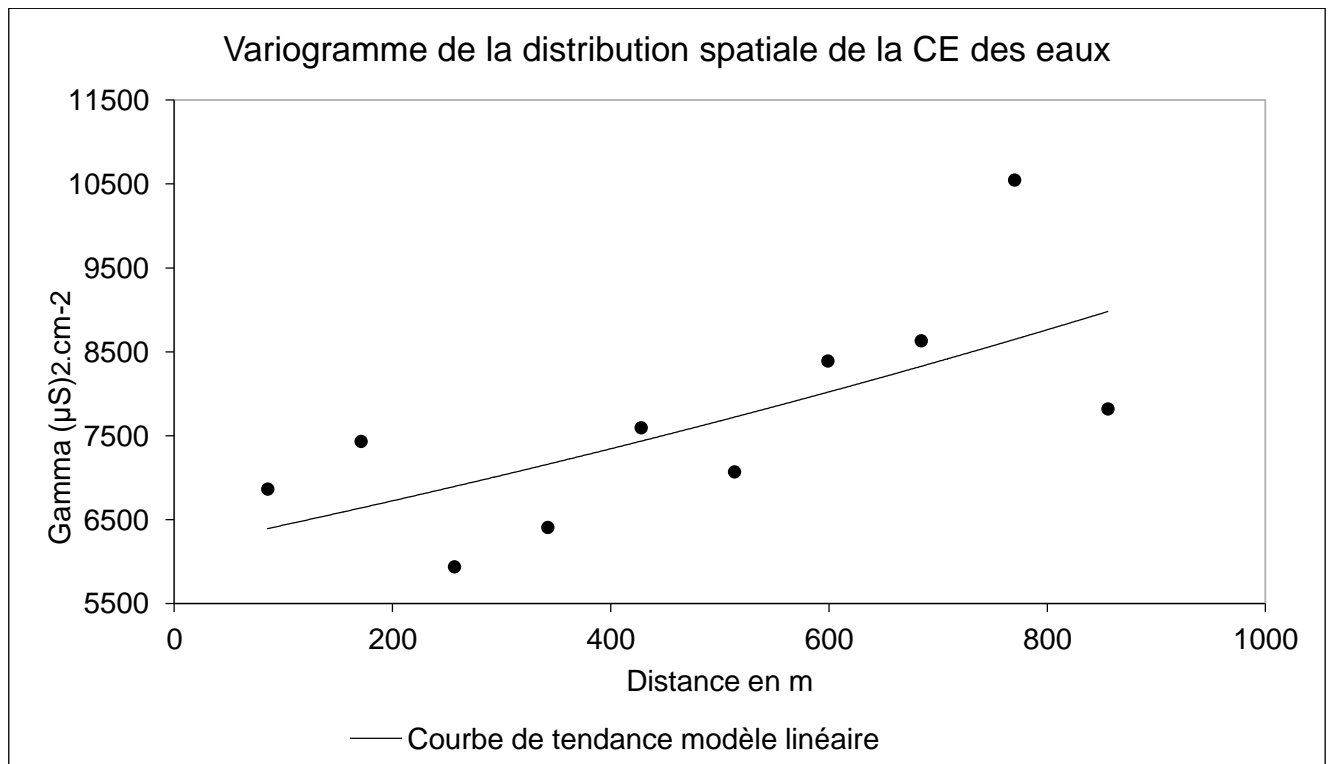


Figure 6 : Variogramme de la Conductivité Électrique

135
136

137

138
139

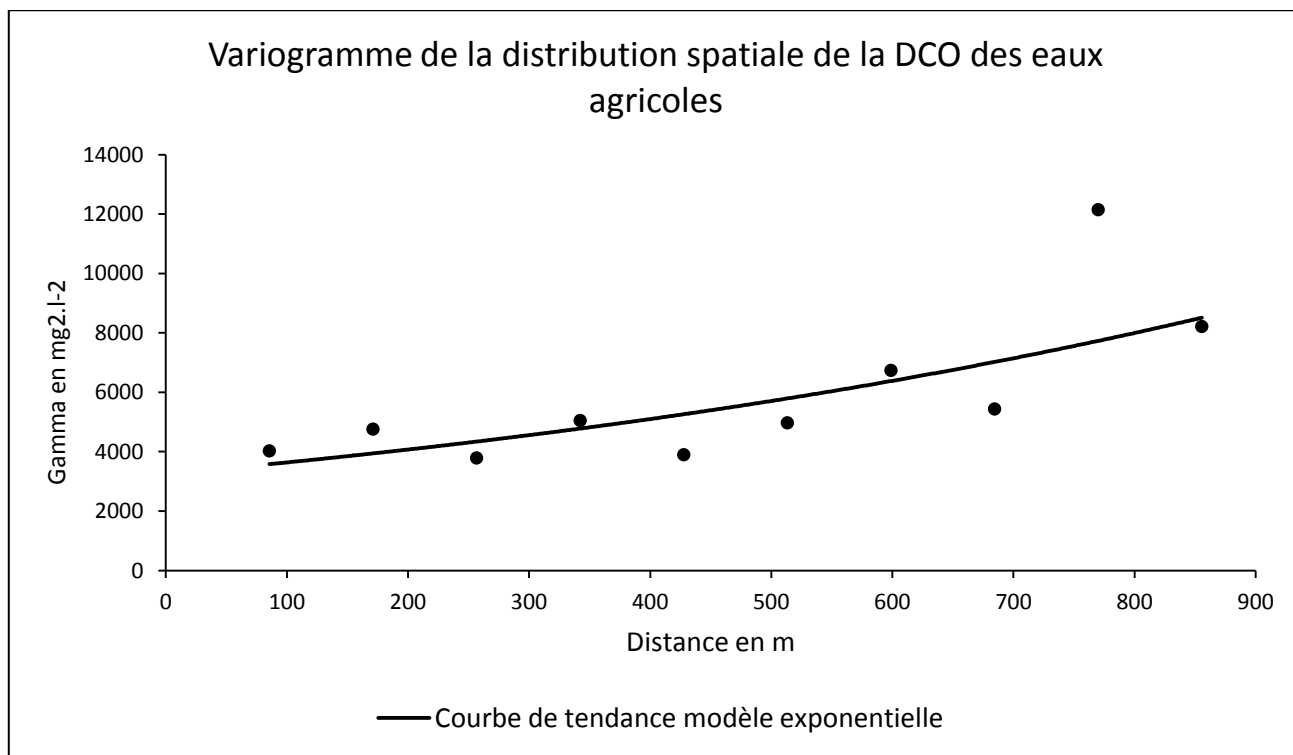


Figure 7 : Variogramme de la DCO

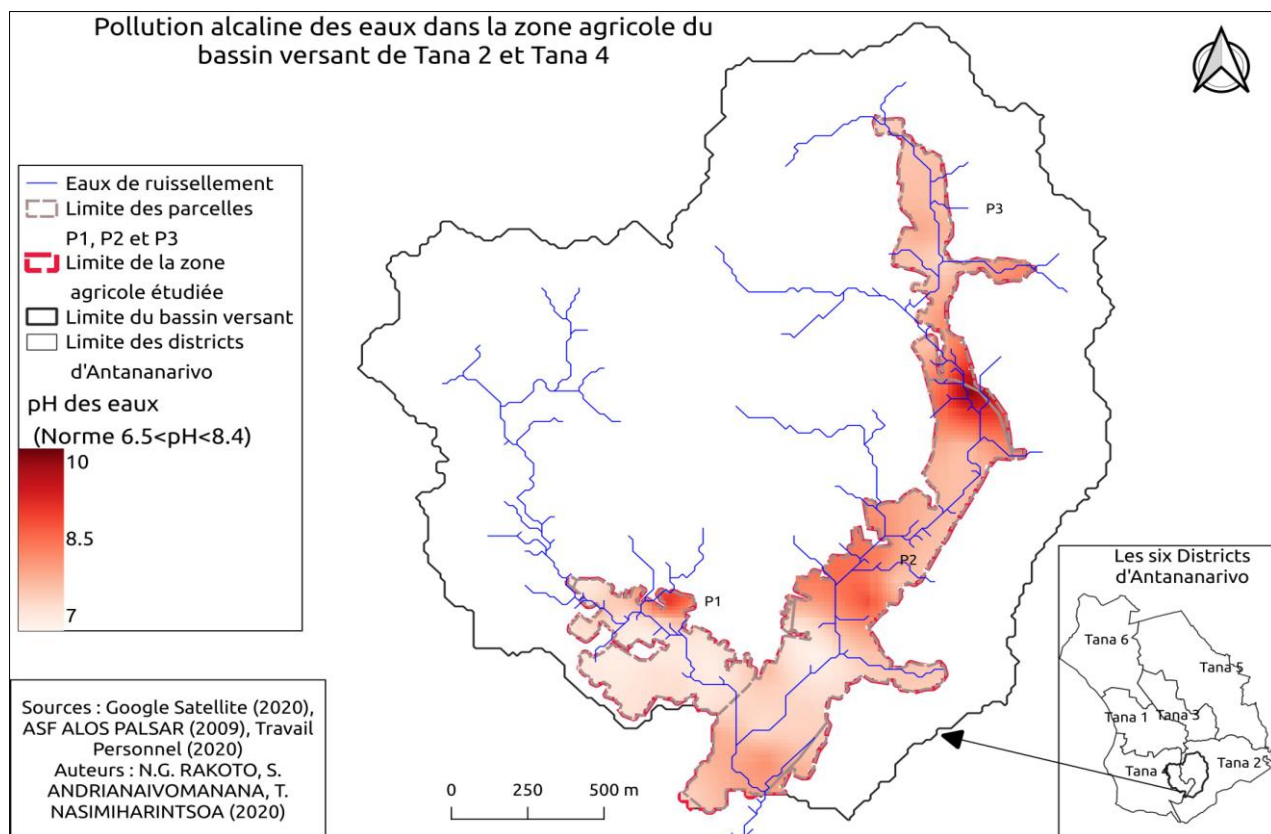
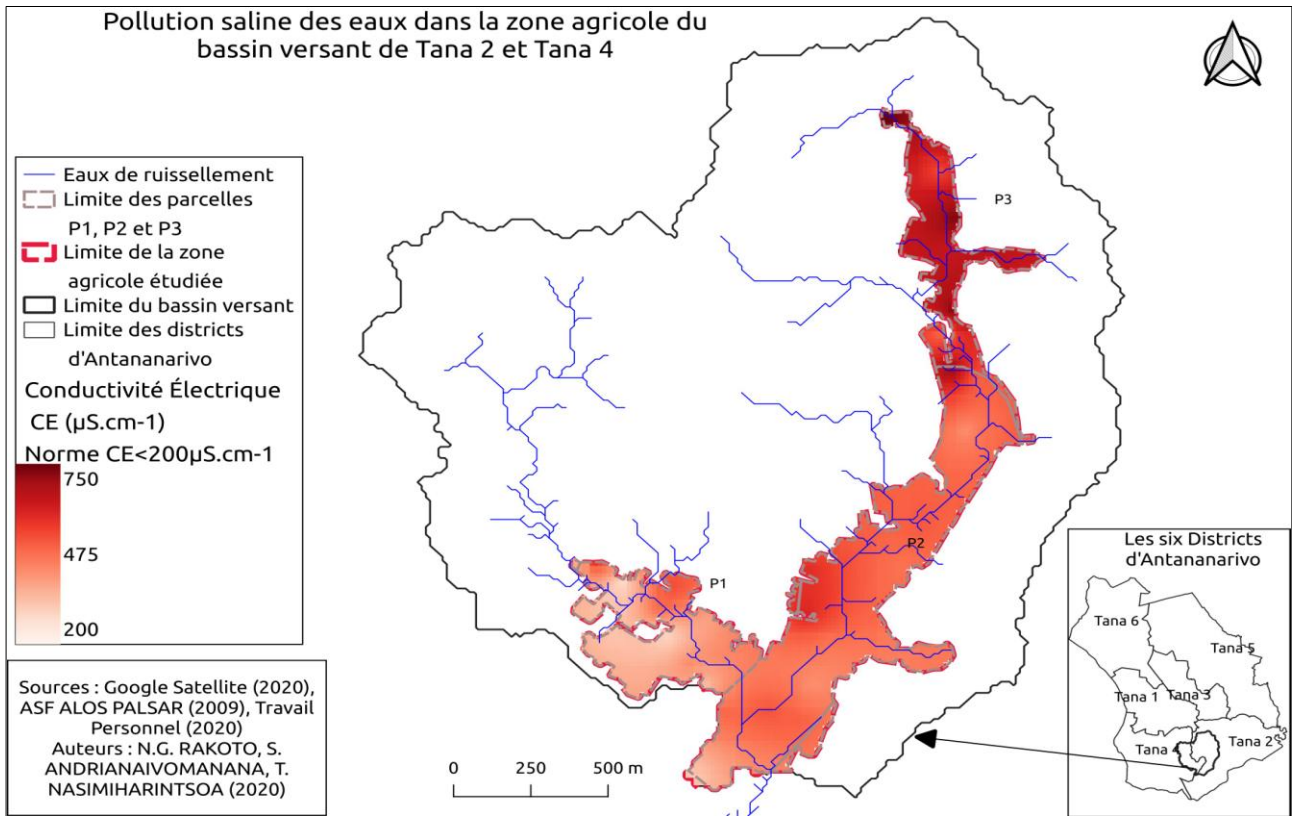
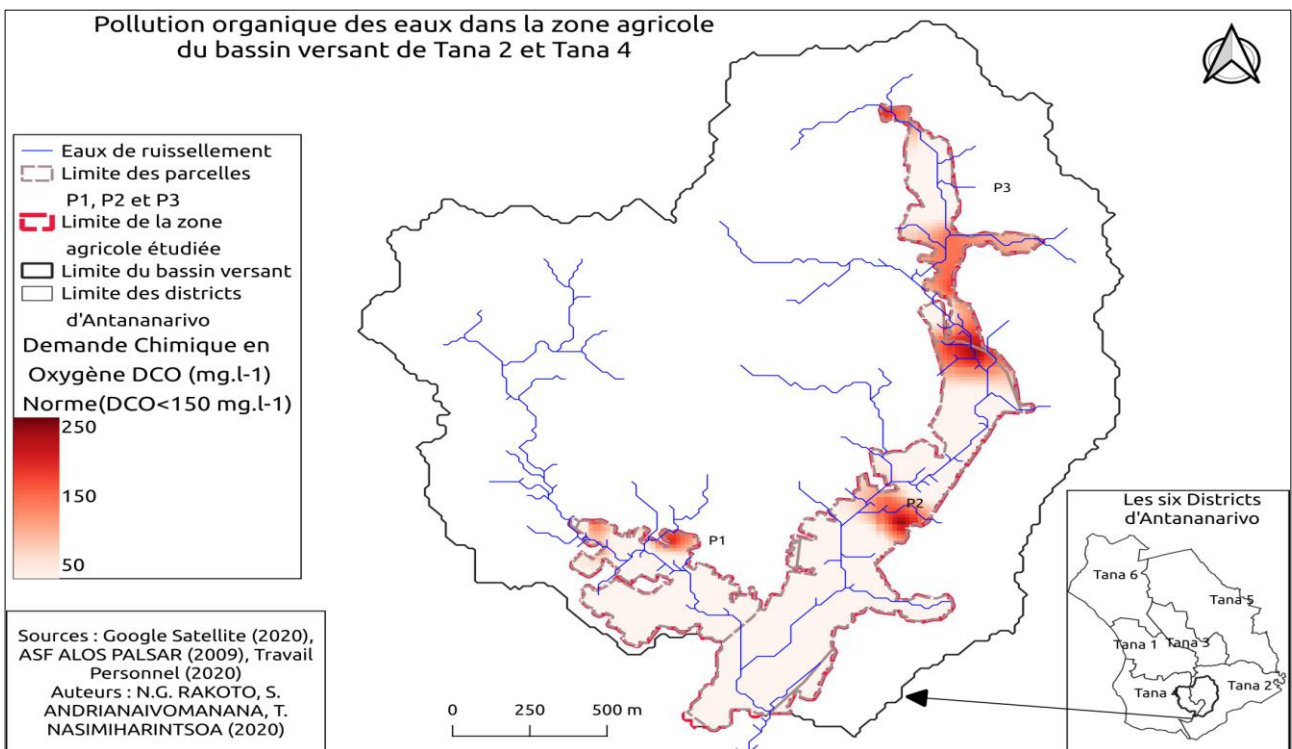


Figure 8 : Répartition spatiale de la pollution alcaline dans la zone étudiée

140



141



142

Figure 9 : Pollution saline des eaux dans la zone agricole du bassin versant de Tana 2 et Tana 4

143

Figure 10 : Pollution organique des eaux dans la zone agricole du bassin versant de Tana 2 et Tana 4

144

145

Variabilité du pH	Kurtosis	3,1
	Modèle	Linéaire
Variabilité de la CE	Kurtosis	0,6
	Modèle	linéaire
Variabilité de la DCO	Kurtosis	0,3
	Modèle	Exponentiel
	Portée	514 m
Distance maximale par défaut		856 m

Tableau 2 : Les caractéristiques du modèle de variabilité spatiale de la pollution des eaux agricoles

4. Conclusion

Cette étude est focalisée sur la distribution spatiale des pollutions alcalines, salines et organiques diffuses des eaux de la zone agricole située dans un grand bassin versant de Tana 2 et Tana 4 – Madagascar. Des prélèvements d'échantillons d'eaux ont été effectués sur 43 points géo référencés choisis aléatoirement dans les trois parcelles P1, P2 et P3 caractérisés par différents types de sols. Ils ont fait l'objet d'analyse de pH, de la Conductivité Électrique et de la Demande Chimique en Oxygène, paramètres indicateurs d'altérations d'eau.

Les valeurs des indicateurs ont été comparées à la norme malgache sur les eaux usées et aux directives de la FAO pour l'irrigation. Le krigeage via l'outil v.kriging du logiciel GRASS GIS a permis de réaliser l'interpolation spatiale des indicateurs pour aboutir à la carte de répartition de la pollution dans cette zone agricole.

Les eaux agricoles dans la parcelle P3, formée par un sol ferrallitique beige rouge sur roche plus ou moins acide fortement décomposé, sont les plus altérées par les éléments minéraux et les matières organiques. Les eaux de la parcelle P2 présentent une alcalinité élevée. La distribution spatiale des pollutions alcaline et saline suit une modèle linéaire avec une distance maximale de répartition de 856 m. Tandis que celle de la organique est conforme à un modèle exponentiel avec une portée de 514 m. Aucune relation n'existe entre les paires de points ayant des distances supérieures à ces valeurs.

5. Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements : - à l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) et à l'Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement de Territoire (IGEAT) – Université de Bruxelles – Belgique, pour l'opportunité d'apprentissage du « Système d'Information Géographique Libre » qu'ils nous ont offerts et – Aux enseignants qui nous ont accompagnés tout au long du stage en SIG Libre de l'année 2019 en particulier madame VANHUYSSSE Sabine du Laboratoire d'Analyse Géospatiale (ANAGEO), IGEAT, Université Libre de Bruxelles.

168 **6. Références bibliographiques**

- 169 A .H. Attingli, L.H. ZINSOU, E.W. VISSIN & P.A. LALEYE (2016). Spatialisation des paramètres physico-chimiques dans les
170 pêcheries de la Basse Vallée de l’Ouémé (sud-Bénin). *Journal of Applied Biosciences*, **Vol. 105**, n° 1, 10190.10202
171 <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v105i1.15>
- 172 A. Laraque, J.S. Moquet, R. Alkattan, J. Steiger, A. Mora, G. Adèle, B. Castellanos, C. Lagane, J.L. Lopez, J. Perez, M.
173 Rodriguez & J. Rosales (2013). Seasonal variability of total dissolved fluxes and origin of major dissolved elements within a
174 large tropical river: The Orinoco, Venezuela. *Journal of South American Earth Sciences*. **Vol. 44**, 4-17.
175 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2012.12.011>
- 176 B. Sofia & K.B. Houria (2011). Évaluation de l’indice de pollution organique dans les eaux naturelles cas de la Région d’El
177 Tarf (Nord-Est Algerien). *Larhyss Journal*. **N° 09**, 171-178. Disponible à l’adresse
178 <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/viewFile/122/116>
- 179 C. AUBRY (2013). L’agriculture urbaine, contributrice des strategies alimentaires des megapoles ? Disponible à l’adresse
180 <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00805185>
- 181 C. Di-Giovanni, M. Campyb & J-R. Disnarc (1999). Des particules charbonneuses, tkmoins des variations de l’érosion
182 chimique d’un bassin versant calcaire durant l’ Holocène (bassin de Chaillexon, Doubs, France). *Earth & Planetary*
183 *Sciences*. **Vol. 328**, 167-172. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(99\)80092-5](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80092-5)
- 184 F. Bourgeat (1968). Carte pédologique. *Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (centre Antananarivo)*.
185 110p. Disponible à l’adresse <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:13745>
- 186 F. Gendreau, P. Gubry & V. Jacques (1983). La population et le défi du développement durable. *Conférence des Nations*
187 *Unies sur l’environnement et le développement (CNUED)*. 14-23.
- 188 G. Aubert et P. SEGALEN (1965). Projet de classification des sols ferralitiques. *ORSTOM*. 97-112. Disponible à l’adresse
189 https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_08-09/10982.pdf
- 190 J. Haury, M.C. Peltre, S. Muller, M. Tremolières, J. Barbe, A. Dutartre & M. Guerlesquin (1996). Les indices macrophytiques
191 pour estimer la qualité des cours d’eau français : premières propositions. *Écologie*, **Vol. 27**, n° 4, 233-244.
- 192 L.E.A. Eba, K.J. kouame, S. Deh, M. Touré, A.K. Anoh & J.P.R. Jourda (2017). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution d’
193 une eau de surface destinée à l’adduction d’eau potable d’une métropole . Cas De La Lagune Agheïn A Abidjan , (Sud

194 De La Cote D'ivoire). *European Journal of Scientific Research*. **Vol. 12**, n° 36, 306-326.
195 <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n36p306>

196 M. Bouchard, (1983). Influences stationnelles sur l'altération chimique des sols dérivés de Till (Sherbrook, Que, Canada).
197 *CATENA*, **Vol. 10**, 363-382. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(83\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0341-8162(83)90004-8)

198 M. Nisbet & J. VERNEAUX (1970). Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classes en
199 tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de Limnologie*. **Vol. 6**, n° 2, 161-190.
200 <https://doi.org/10.1051/limn/1970015>

201 Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts Malagasy (2003). Décret N°2003/464 sur la classification des eaux de
202 surfaces et réglementations des rejets d'effluents liquides Malagasy.

203 Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (2003). L'Irrigation Avec Des Eaux Usees Traitees.
204 Disponible à l'adresse : http://www.pseau.org/outils/ouvrages/fao_irrigation_avec_des_eaux_usees_traitees_2003.pdf

205 P. Drechsel, C. A.Scott, L. Raschid-Sally, M. Redwood & A. Bahri (2011). Irrigation avec des eaux usées et la santé- Evaluer
206 et atténuer les risques dans les pays à faible revenu. *Presses de l'Université du Québec*. ISBN 9782760531604. Disponible
207 à l'adresse : <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/47374>

208 P. Négrel (1997). Traçage des apports anthropiques sur un petit bassin versant : utilisation des rapports isotopiques du
209 strontium, des éléments majeurs et traces. *Geochimie/Geochronologie*. 907-914.
210 [https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1997CRASE.324..907N/doi:10.1016/S1251-8050\(97\)82504-9](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1997CRASE.324..907N/doi:10.1016/S1251-8050(97)82504-9)

211 Y. Wu, S. Giri & Z. Qiu (2016). Understanding the spatial distribution of hydrologic sensitive areas in the landscape using
212 soil topographic index approach. *International Soil and Water Conservation Research*, **Vol. 4**, n° 4, 278-283.
213 DOI 10.1016/j.iswcr.2016.10.002. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.10.002>

214 Y.C. Chen, H.C. Yeh & C. Wei (2012). Estimation of river pollution index in a tidal stream using kriging analysis.
215 *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **Vol. 9**, n° 9, 3085-3100.
216 <https://doi.org/10.3390/ijerph9093085>

217 M-H. Dabat, B. Andrianarisoa, C. Aubry, E. Faramalala Ravoniarisoa, H. Randrianasolo, N. Rakoto, S. Sarter & S. Trèche
218 (2010). Production de cresson à haut risque dans les bas fonds d'Antananarivo ? *VertigO*. Vol. 10, n° 2. 19p.
219 DOI 10.4000/vertigo.10022. Disponible à l'adresse : <http://vertigo.revues.org/10022>