

Modélisation spatiale du transfert des nitrates dans un bassin versant agricole: Cas du bassin versant de Ono (Côte d'Ivoire)

T. KONE^{1*}, B.A. AMA-CAUPHYS¹, L.C.A. MANGOUA-ALLALI¹, J-C. K. N'DRI¹, J-M. P. OUATTARA¹, L. COULIBALY¹

(Reçu le 05/10/2022; Accepté le 08/11/2022)

Résumé

Le Bassin Versant de Ono (BVO), dans la région du Sud Comoé, est dominé par les cultures agro-industrielles utilisant des fertilisants chimiques. Cela constitue une source importante de pollution, particulièrement aux nitrates. Cette étude visait à modéliser le transfert des nitrates vers les eaux de surface du BVO en deux étapes: (i) modéliser l'érosion hydrique de la zone et (ii) estimer la quantité d'azote dans le BVO. La combinaison de ces paramètres de vulnérabilité, précédée d'une analyse multicritère, a permis d'obtenir une carte des risques de transfert des nitrates vers les eaux de surfaces. Cette cartographie révèle que les classes de Risques Faible et Très Faible représentent 65,5% du BVO. Les classes de Risque Élevé représentent 25,2% de la superficie du BVO et concernent la zone de production d'ananas de Ono-Salci près de la lagune Ono. Les classes de Risque Moyen occupent 9,29% du bassin et concernent les zones de production d'hévéa et de palmier à huile de Bongo. Ainsi, cette analyse multicritère spatiale simple a permis de simuler les risques de transfert des nitrates vers les eaux de surface du BVO. Cette étude pourrait être approfondie en analysant les nitrates dans des échantillons d'eau de surface du BVO.

Mots clés: Nitrates, Pollution diffuse, Vulnérabilité, Eaux de surface, Agriculture, Culture d'ananas, Bassin versant agricole

Spatial modeling of nitrate transfer in an agricultural watershed: The Ono watershed case (Côte d'Ivoire)

Abstract

The Ono Watershed (OWB), in the South Comoé region, is dominated by agro-industrial crops using chemical fertilizers. This constitutes a major source of nitrate pollution. This study aimed to model the transfer of nitrates to the surface waters of the BVO in two steps: (i) modeling the water erosion of the area and (ii) estimating the amount of nitrogen in the BVO. The combination of these vulnerability parameters, preceded by a multi-criteria analysis, resulted in a map of the risk of nitrate transfer to surface waters. This map reveals that the Low and Very Low-Risk classes represent 65.5% of the BVO. The High-Risk classes represent 25.2% of the BVO and concern the pineapple production area of Ono-Salci near the Ono Lagoon. The Medium Risk classes occupy 9.29% of the basin and concern Bongo's rubber and oil palm production areas. Thus, this simple spatial multi-criteria analysis allowed for the simulation of the risk of nitrate transfer to surface waters in the BVO. This study could be complemented by analyzing nitrates in surface water samples from the BVO.

Keywords: Nitrates, Diffuse pollution, Vulnerability, Surface water, Agriculture, Pineapple crop, Agricultural watershed

INTRODUCTION

Depuis la fin des années 1950 environ, des contaminations diffuses de nitrates d'origine agricole ont été mises en évidence dans des hydro-systèmes de par le monde. Les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines et de surface ne cessent en effet d'augmenter de manière quasi linéaire depuis cette période (Mariotti, 1994). Ces augmentations s'observent plus particulièrement dans les régions d'agriculture intensive (Hansen *et al.*, 2010), conséquence de l'augmentation de l'utilisation d'engrais azotés (Costa *et al.*, 2002). D'autres origines plus ponctuelles (rejets industriels, rejets urbains, etc.) sont aussi des sources d'azote.

En Côte d'Ivoire, le développement du secteur agricole a entraîné une augmentation de la quantité d'engrais utilisée, ce qui représente une source de pollution tant ponctuelle que diffuse des ressources en eau. En effet, les études de modélisation spatiale et d'analyse multicritères menées par Anoh *et al.* (2012) et Eba *et al.* (2013) ont permis de montrer des risques de pollution généralisée des eaux de surfaces par les nitrates et les produits phytosanitaires. De toutes les régions de la Côte d'Ivoire, la région de Bonoua présente le taux d'utilisation d'intrants agricoles le plus important (54%) (MEMA, 2001). L'intensification des pratiques agricoles dans cette région pourrait exposer le bassin versant de Ono (BVO) à une pollution diffuse aux nitrates et aux produits phytosanitaires. Selon Eyi *et al.* (2016), le BVO

renferme d'importantes zones d'occupation humaine et de grandes plantations industrielles (ananas, hévéa et palmier à huile) et villageoises de cultures pérennes. Le lessivage de ces terres est une source permanente de pollution par le nitrate qui constitue une menace aussi bien pour la qualité des ressources en eau que pour la communauté biologique vivant dans les eaux de ce bassin ainsi que pour la santé des populations. La prévention des risques de pollution des eaux de ce bassin passe par une bonne connaissance des zones vulnérables à la pollution et l'évolution de cette vulnérabilité dans le temps. De ce fait plusieurs travaux ont pu être réalisés. En effet, les travaux réalisés par Aké (2001) et Efini (2007) abordent essentiellement la quantité et la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la région de Bonoua. Aké (2010) a étudié la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (NO_3^-) de la nappe de Bonoua par les méthodes Drastic et Si. Cependant, peu d'études réalisées concernent le transfert de la pollution aux nitrates vers les eaux de surface de la région de Bonoua. C'est dans ce cadre que cette étude s'est proposée de mettre en œuvre un modèle spatial permettant l'évaluation des risques potentiels de contamination des eaux de surface par les nitrates en zone de culture d'ananas dans le BVO. Il s'agit d'évaluer les risques potentiels de contamination des eaux de surface par les nitrates sur le bassin versant de Ono (BVO) à partir de l'USLE et des données de télédétection disponibles couplées à celles de terrain. De façon spécifique, l'étude

¹ Laboratoire d'Environnement et de Biologie Aquatique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire

visé à: (i) évaluer la pression anthropique liée à l'épandage d'azote sur les zones agricoles du BVO, (ii) analyser les indicateurs relatifs à la sensibilité du BVO au transfert de la pollution vers les eaux de surface et (iii) modéliser le risque potentiel de contamination des eaux de surface du BVO par les nitrates.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Présentation du site de l'étude

L'étude a été conduite dans le bassin versant de Ono (BVO) situé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 590013,610877–617636,597953 m Nord et les longitudes 434823,979423–450927,066059 m Est, suivant le système de coordonnées géographiques projetées UTM. Cette zone couvre une superficie de 274 km² avec un périmètre de 134 km. Ce bassin se présente sous une forme allongée avec un indice de compacité de Gravelius KC estimé à 2,28. Il partage plusieurs villages (Bongo II, Wehou, Ono, Kladiro, Akroaba Akoudjekoa, Valhamba, Ono Salci, Ingarako, Bato, Alosso II) issus de deux (2) Sous-préfectures de la Région administrative du Sud-Comoé (Bonoua et Bongo). Le BVO dispose de deux types de sols. Il s'agit des sols ferrallitiques fortement remaniés appauvris en argile qui occupent la quasi-totalité du BVO et les sols hydromorphes. La lagune Ono est le principal cours d'eau permanent du BVO. Elle a une superficie d'environ 400 ha et s'ouvre sur le fleuve Comoé qui se jette à son tour dans l'océan Atlantique. Le BVO est dominé par les cultures agro-industrielles utilisant des fertilisants chimiques.

Données collectées sur le bassin pour la modélisation

Des données alphanumériques et des images satellitaires et de cartographies ont été collectées. Les données alphanumériques se composent d'une part des doses d'azote

épandues (proportion en azote par type d'engrais utilisé et de culture pratiquée sur la saison culturale de 2017 à 2018) et d'autre part des données pluviométriques de la période 1986 à 2016. Les premières données ont été obtenues à partir de la fiche technique des cultures fournie par le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA).

Les charges moyennes des apports d'engrais (Qa) et les superficies fumées (Sf) de la saison culturale 2017-2018 ont été collectées auprès de la Société africaine de Production d'Hévéa (SAPH) et la Société de Culture et de développement de la Banane (SCB) qui sont les principaux détenteurs des plantations d'hévéa, de palmier à huile et d'ananas du BVO. Les données pluviométriques de la période 1986 à 2016 ont été acquises sur le site de la Nationale Aeronautics and Space Administration (NASA). Toutes ces données collectées ont été saisies et traitées à l'aide des tableurs Excel (2013) et Statview 1.7 (1997).

S'agissant des données cartographiques, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'image d'Aster Global Élévation Model version 2 (ASTGEM 2) d'une résolution de 30 m couvrant la zone d'étude a été utilisé pour la délimitation du bassin, l'extraction du réseau hydrographique, la détermination des altitudes et des seuils des pentes. L'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/200000 dressée par Orstom-Sodemi a servi à l'élaboration de la carte pédologique (Perraud et De la Souchère, 1970). Également, le Shape file des villages et celui des limites administratives de la Côte d'Ivoire fourni par le Centre National de Télédétection et d'Information Géographique (CNTIG) ont été utilisés pour la présentation de la zone d'étude et la validation des sites d'occupation du sol. Les données cartographiques et alphanumériques avec des coordonnées sur support numérique sont directement importées dans le logiciel ArcGIS.

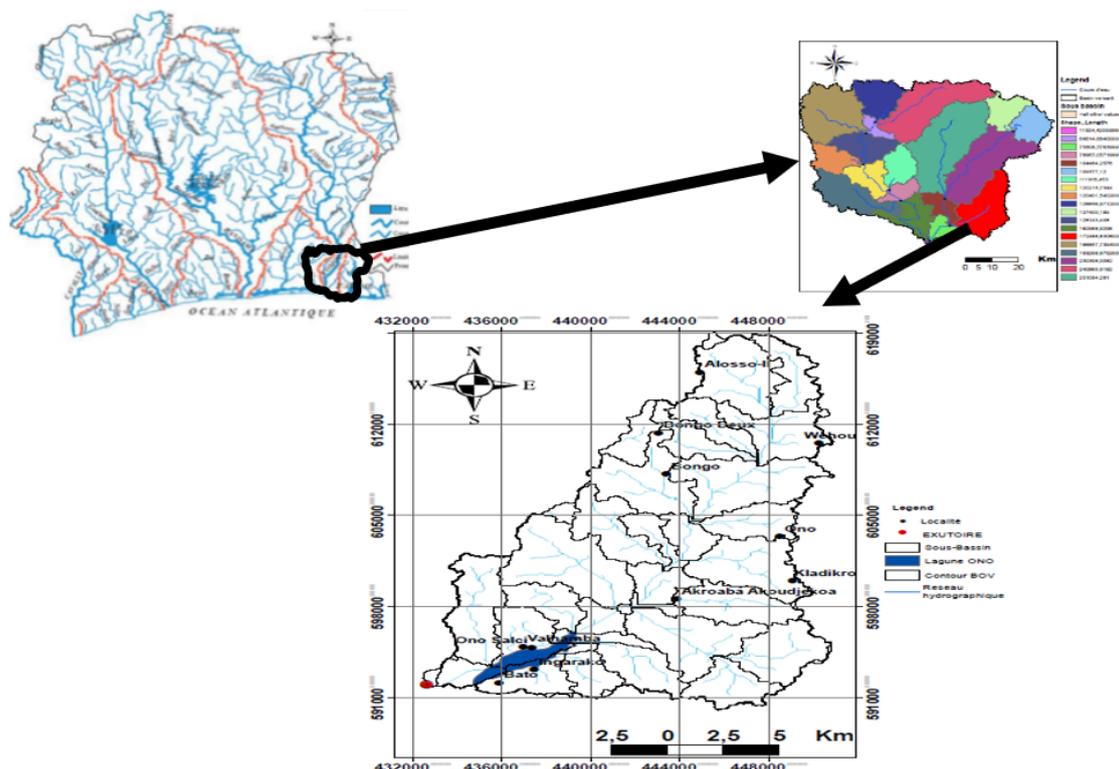


Figure 1: Carte de géolocalisation du Bassin Versant de Ono

Pression exercée par les activités anthropiques sur le milieu

Les pressions polluantes sont définies comme l'ensemble des pratiques susceptibles d'entraîner une pollution (Christine, 2001). Il s'agit dans cette étude des pratiques agricoles qui peuvent induire la pollution de la rivière Ono. Ces pressions sont identifiées à travers l'analyse de l'occupation des sols du bassin versant qui alimente la rivière Ono (Rosi *et al.*, 2009). L'occupation du sol désigne l'ensemble des activités pratiquées à la surface du sol. Elle renferme les sources potentielles de pollution des retenues d'eau. En effet, ces sources potentielles de menace concernent les rejets des activités anthropiques susceptibles d'engendrer des polluants. Ainsi, l'estimation de la dose en azote épanchée (DN) sur toute l'étendue du BVO et l'indicateur de pression azote (InPrAzot) induite par les surfaces agricoles ont été évalués. L'enjeu ici est la sauvegarde de la qualité de l'eau de ladite rivière.

Carte d'occupation des sols

Ce paramètre a été obtenu à partir d'une image Landsat 8 OLI-TIRS du 25 Décembre 2017 de résolution 30 m à partir des scènes 196-55. L'acquisition de la carte de la couverture du sol de la zone d'étude à partir de cette image satellitaire a été possible grâce à la classification supervisée sous le logiciel ENVI 4.3. Les classes d'occupation du sol reconnues sont les suivantes: plan d'eau et cours d'eau, forêt dense, mosaïque forêt culture, mosaïque culture jachère, culture industrielle (Hévéa et Palmier à huile), sol nu et habitat. La carte d'occupation du sol de la zone d'étude a été exportée sous ArcMap afin d'être utilisée pour la détermination des autres facteurs intervenant dans le transfert des nitrates sur le BVO.

Estimation de la dose en azote épanchée (DN) sur toute l'étendue du bassin versant de Ono

La dose moyenne annuelle en azote (DN) issue des engrais NPK et de l'urée appliquée dans les différentes zones agricoles est donnée par l'équation (1):

$$DS = Qa \times Sf \times p \quad (1)$$

Avec:

DN: Dose moyenne annuelle en Azote (kg/an);

Qa: Quantité moyenne annuelle de fertilisant appliqué (kg/ha/an);

Sf: Surface fumée appliquée (ha);

p: Pourcentage moyen d'azote dans les produits fertilisant (%). Une interpolation des doses moyenne annuelle en Azote a été faite à l'aide de l'outil d'interpolation IDW sous le logiciel ArcGIS en vue de la spatialisation des données concernant les doses épanchées sur le bassin versant de Ono (BVO).

Évaluation de la pression azote (InPrAzot) induite par les surfaces agricoles

L'indicateur de pression azote (InPrAzot) suivant les zones agricoles BVO est obtenu par multiplication de la carte des doses d'azote épanchées et de la carte d'occupation du sol spécifique aux surfaces agricoles. Pour ce faire, la carte d'occupation du sol a été reclassée sous ArcGIS en affectant une valeur nulle aux zones non agricoles (plan d'eau et cours

d'eau; forêt dense; sol nu; et habitat et affleurement rocheux) et la valeur de la superficie emblavée aux zones agricoles (plantation d'ananas, d'hévéa et de palmier à huile). Cette démarche a permis d'évaluer au sein du BVO les quantités d'azote emblavées sur chaque zone agricole par rapport à leur surface spécifique. Ainsi, cinq classes de niveaux de pression des apports d'azote ont été définies à partir de la méthode de classification suivie par Antoni *et al.* (2002) à l'aide du logiciel ArcGIS suivi de l'affectation des cotes à leurs niveaux de pressions polluantes: 1 (très faible), 2 (faible), 3 (moyen), 4 (élevé) et 5 (très élevé) (Tableau 1).

Tableau 1: Classification des niveaux de pressions polluantes d'azote induites par les surfaces agricoles du BVO (Antoni *et al.*, 2002)

Quantités annuelles d'apport en azote par superficie agricoles (kg/an)	Cote	Niveau de pression polluante
0 - 131 708,8118	1	Très faible
131 708,8119 - 219 514,6863	2	Faible
219 514,6864 - 290 856,9593	3	Moyen
290 856,9594 - 329 272,0294	4	Élevé
329 272,0295 - 349 851,5313	5	Très élevé

Vulnérabilité de la ressource en eau aux nitrates

L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux de surface passe par l'identification et l'évaluation des mécanismes susceptibles d'amener la charge polluante depuis la source jusqu'aux eaux de surface (El Ouali *et al.*, 2014). Si l'on exclut le transfert par voie aérienne, le transfert des polluants vers les eaux de surface se fait soit par le ruissellement (CORPEN, 2007), par l'érosion du sol vers le réseau hydrographique, étant donné qu'une partie des engrais peut être fixée ou absorbée sur les particules du sol (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Dans cette étude, les indicateurs de la vulnérabilité du milieu au transfert de la pollution vers les eaux de surface liée à l'érosion hydrique des sols ont été évalués (Le Bissonnais *et al.*, 2002).

Indicateur de couverture végétale

La couverture du sol joue un rôle prépondérant dans l'érosion hydrique des sols. En effet, une terre boisée aura tendance à protéger les terres de l'érosion hydrique des sols tandis qu'une terre nue ou imperméabilisée aura tendance à faciliter l'érosion hydrique des sols. Dans ce travail, l'influence de la couverture du sol a été déterminée après une reclassification sous le logiciel ArcGIS des composantes de la carte d'occupation du sol suivant leurs indices de couverture végétale respectifs (facteur C) (Wischmeir et Smith, 1978). L'échelle de classement des indices végétaux tend vers 0 lorsque la sensibilité du milieu à augmenter l'érosion est très faible. Cependant, l'indice évolue vers 1 pour une sensibilité du milieu très élevée (Tableau 2).

Tableau 2: Classification de la sensibilité du milieu liée à la couverture végétale (Wischmeir et Smith, 1978)

Classe d'occupation du sol	Indices de couverture végétale	Cote	Sensibilité
Forêt dense, mosaïque forêt culture, culture industrielle (Hévéa, Palmier à huile)	0,001-0,1	1	Très faible
Mosaïque cultures jachères	0,30-0,40	3	Moyenne
Sols nus et habitats, eau	0,70-1,00	5	Très élevée

Indicateur de l'érosivité de la pluie

L'érosivité de la pluie joue sur le débit du ruissellement et donc sur les possibilités de détachement des particules et la capacité de transport de l'écoulement. Par ailleurs, elle influence directement le détachement du sol (Fox *et al.*, 2008). Ce paramètre étant rarement disponible, l'équation simplifiée intégrant uniquement la hauteur de pluie moyenne, proposée par Roose (1977) pour l'Afrique de l'Ouest a été utilisée pour évaluer l'érosivité de la pluie sur la période d'étude 1986 à 2017.

L'érosivité de la pluie est exprimée par l'équation (2):

$$R = 0,5 \times P + 0,05 \quad (2)$$

Avec: R: Érosivité moyenne annuelle (MJ.ha⁻¹.mm.an⁻¹),
P: Pluie moyenne annuelle (mm.an⁻¹).

Par ailleurs, cette équation a été appliquée aux données de pluviométrie moyennes annuelles des stations pluviométriques environnant le bassin versant de Ono (Bonoua, Alépé et Adiaké) afin de déterminer l'érosivité moyenne annuelle de chaque zone. Les érosivités obtenues sont ensuite interpolées suivant l'option IDW sous le logiciel ArcGIS. Enfin, une classification cotée de 1 à 5 a été attribuée aux résultats de l'interpolation spatiale suivant la méthode de Antoni *et al.* (2012) (Tableau 3).

Tableau 3: Classification de la sensibilité du milieu liée à l'érosivité des pluies (Antoni *et al.*, 2012)

Érosivité des pluies (MJ.ha ⁻¹ .mm.an ⁻¹)	Cote	Sensibilité
1 364 - 1 396	1	Très faible
1 396 - 1 420	2	Faible
1 420 - 1 444	3	Moyenne
1 444 - 1 470	4	Élevée
1 470 - 1 509	5	Très élevée

Indicateur topographique: indicateur de facteur de pente LS

Le facteur topographique, facteur de pente "LS" utilisé dans cette étude est celui issu de la méthode de l'Equation Universelle des Pertes de Sol (USLE). Il représente la combinaison des effets de la longueur de pente "L" et du gradient "S" des pentes. Ce facteur permet d'évaluer les pertes de sols par l'érosion hydrique susceptibles d'absorber et d'entraîner les particules polluantes. De plus, la pente traduit les zones potentiellement favorables au ruissellement ou à l'infiltration. Ce facteur topographique "LS" du BVO a été développé sous ArcGIS suivant la méthode de Mitasova et Mitas (1999) améliorée par Engel (2003) (équations 3, 4 et 5):

$$LS = \left(\frac{As}{22,13}\right)^{0,4} \left(\frac{\sin\beta}{0,0896}\right)^{1,3} \quad (3)$$

$$\text{Flowacc} = \text{FlowAcc}(\text{FlowDir}([\text{elevation}])) \quad (4)$$

$$LS = \text{Pow}([\text{Flowacc}] \times \text{resolution} / 22,1 ; 0,4) \times \text{Pow}(\sin[\text{slope}] \times 0,01745 / 0,0896 ; 1,3) \quad (5)$$

Avec:

- LS: Longueur et inclinaison de pente;
- As: surface de contribution spécifique;
- β: angle de pente (en degré);
- Flowacc: surface d'accumulation des écoulements;
- Flowdir: direction des écoulement ;
- Pow: exposant;
- Sin: sinus.

A l'issue du calcul du facteur topographique, 5 classes de sensibilités ont été définies suivant Antoni *et al.* (2012) (Tableau 4).

Tableau 4: Classification de la sensibilité du milieu liée au facteur de pente LS (Antoni *et al.*, 2012)

Classes des valeurs du facteur de pente	Cote	Sensibilité
0,00 - 7,80	1	Très faible
7,81 - 15,60	2	Faible
15,61 - 23,40	3	Moyenne
23,41 - 31,20	4	Élevée
31,21 - 39,00	5	Très élevée

Indicateur d'érodabilité des sols

L'érodabilité d'un sol qui est l'aptitude intrinsèque de ce sol à être détaché et transporté sous l'action conjuguée des gouttes de pluie et du ruissellement (Le Bissonnais *et al.*, 2002), est en partie fonction de ses propriétés physiques notamment sa texture et sa structure. Dans la région de Bonoua, les travaux effectués par Aké (2010) révèlent 4 classes de sensibilité à l'érosion hydrique liées à l'érodabilité du sol et ce en fonction du type de sol rencontré. Il s'agit entre autres des sols hydromorphes minéraux ou organiques (vulnérabilité faible), des sols ferrallitiques typiques sur granites ou sur schiste (vulnérabilité moyenne), des sols ferrallitiques sur sables tertiaires fortement remaniés et appauvris en argile (vulnérabilité forte), des sables quaternaires ou des sables marins actuels (vulnérabilité très forte). Ainsi les sols rencontrés sur le BVO sont des sols ferrallitiques sur sables tertiaires fortement remaniés et appauvris en argile et des sols hydromorphes minéraux ou organiques. Donc, deux classes de sensibilités à l'érosion hydrique liées à l'érodabilité du sol ont été définies en suivant la classification de Aké (2010) (Tableau 5).

Tableau 5: Classification de la sensibilité du milieu liée à l'érodabilité d'un sol (Aké, 2010)

Érodabilité des sols	Cote	Sensibilité
Sols ferrallitiques sur sables tertiaires fortement remaniés et appauvris en argile	4	Forte
Sols hydromorphes minéraux ou organiques	1	Faible

Indicateur des pratiques de conservation des sols agricoles (Pc)

L'indicateur des pratiques de conservation des sols agricoles (Pc) correspondant aux pratiques de conservation des sols a été élaboré pour tenir compte des pratiques de conservation du sol. Il varie entre 0 et 1. Dans cette étude, la valeur de Pc a été prise égale à 1 à l'instar de l'étude de Coulibaly (2007) pour les zones de mosaïque de culture jachère et 0 pour les zones non agricoles ainsi que les zones de forêt dense et des plantations d'hévéa. En effet, les visites de terrain ont permis de constater que les paysans ne pratiquent pas de techniques anti-érosives. Aussi, les pratiques culturelles (labourage, attelage, etc.) contribuent-elles à accentuer davantage le phénomène d'érosion. Cependant, pour ce qui concerne les zones de forêt dense, les plantations d'hévéa et de palmier à huile constituent elles-mêmes des barrières à l'érosion hydrique des sols. Ainsi, la sensibilité du milieu liée aux pratiques agricoles reste très élevée (cote 5) pour les zones de Ono et localités environnantes et très faibles (cote 1) pour les autres zones du BVO.

Carte de risques potentiels de transfert du nitrate vers les eaux de surface du bassin versant de Ono induit par l'érosion hydrique

L'Équation Universelle des Pertes de Sol (USLE) de Wischmeier et Smith (1978) a été utilisée pour la détermination des quantités de terre érodées. Ainsi le risque potentiel de transfert de la pollution des nitrates par les pertes de sols (Re) sur le BVO a été évalué à partir de l'équation (6) à l'aide de l'outil ArcGIS. Après normalisation des valeurs obtenues, les classes de risques allant de 1 (très faible) à 4 (élevé) ont été constituées.

$$Re = \text{InPrAzot} \times (R \times K \times LS \times C \times Pc) \tag{6}$$

Avec:

Re: Carte du risque potentiel du milieu au transfert de la pollution par l'érosion hydrique; InPrAzot: Carte de sensibilité du milieu liée à la pression polluante des apports en azote; R: Carte de sensibilité du milieu liée à l'érosivité de la pluie; K: Carte de sensibilité du milieu liée à l'érodabilité des sols; LS: Carte de sensibilité du milieu liée au facteur LS (Longueur et inclinaison des pentes); C: Carte de sensibilité du milieu liée à la couverture végétale du sol; Pc: Carte de sensibilité du milieu liée aux pratiques de conservation des sols.

RÉSULTATS

Pression des quantités d'azotes épanchées sur les eaux de surface du bassin versant de Ono

Variation spatiale de la dose d'azote appliquée sur le bassin versant de Ono

La Figure 2 montre la variation spatiale des doses moyennes annuelles d'azote (DN) épanchées sur le BVO sur la saison culturale 2017-2018. Les plus fortes DN (>43,9) étaient épanchées dans la zone Sud et Sud-Est partant de Bato à Kladikro tandis que les plus faibles sont localisées au Nord et au Nord-Ouest du BVO en allant de Bongo à Alosso-II.

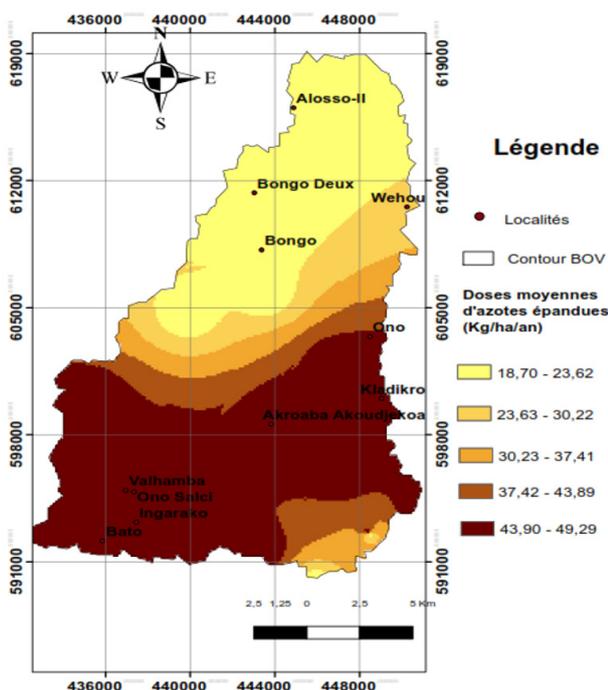


Figure 2: Variation spatiale des doses annuelles d'azote appliquées sur le bassin versant de Ono

Carte de l'indicateur de pression de l'épandage d'azote dans les zones agricoles

Les niveaux de pression de l'épandage de l'azote (InPrAzot) sur les zones agricoles du BVO sont présentés par la Figure 3. L'InPrAzot est élevé et très élevé dans la zone Sud et Sud-Ouest du BVO (>329 272 kg/an). Par contre, il reste très faible au Nord du BVO, dans la zone de Bongo (<131 709 kg/an).

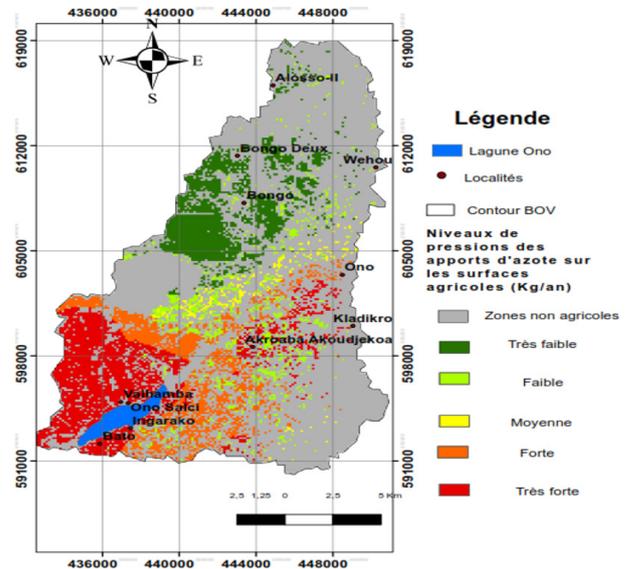


Figure 3: Carte de pression des quantités moyennes annuelles d'azote épanchées sur les zones agricoles du bassin versant de Ono

Carte d'occupation du sol du bassin versant de Ono

La Carte d'Occupation du Sol (COS) obtenue à partir de la classification de l'image issue de la scène 196-55 du satellite Landsat 8 OLI-TIRS du 25 Décembre 2017 est représentée par la Figure 4. La COS du BVO affiche six (6) classes avec des proportions surfaciques évoluant de façon croissante de 6,25% (eau); 6,72% (Sols nus et habitats); 9,67% (Forêt dense); 17,8% (Mosaïque forêts cultures); 20,5% (Mosaïque cultures jachères); et 29,1% (Cultures industrielles d'Hévéa et de Palmier à huile). Ainsi on remarque que la plupart des zones de mosaïque cultures jachères se rencontrent au Sud-Ouest du BVO dans la zone de Ono-Salci; les grandes plantations d'hévéa et de palmier à huile se rencontrent au Nord dans la zone de Bongo; la grande forêt dense du BVO se trouve entre Ono-Salci et Bongo; les mosaïques forêts cultures et les sols nus et habitats se retrouvent disséminés sur tout l'ensemble du BVO.

Sensibilité des paramètres du bassin versant de Ono au transfert de la pollution vers les eaux de surface

Sensibilité du milieu liée à la couverture végétale

La Figure 5 présente la sensibilité du milieu liée à la couverture végétale (Cv) du BVO. La partie Nord-Ouest et Nord du BVO (Bongo, Alosso, Wehou) est celle qui renferme des zones à indice de couverture végétale très forte, présentant une sensibilité très faible à l'érosion hydrique. Cette zone représente la plus grande superficie sur le BVO (53,1%). La zone Sud-Ouest (Ono Salci, Bato, Ingarako) présente une sensibilité moyenne à l'érosion et couvre une superficie de 22,0%. Les zones de sensibilités très élevées

à l'érosion hydrique du fait de la couverture végétale sont disséminées sur le BVO et représentent 23,8% de la superficie totale du BVO.

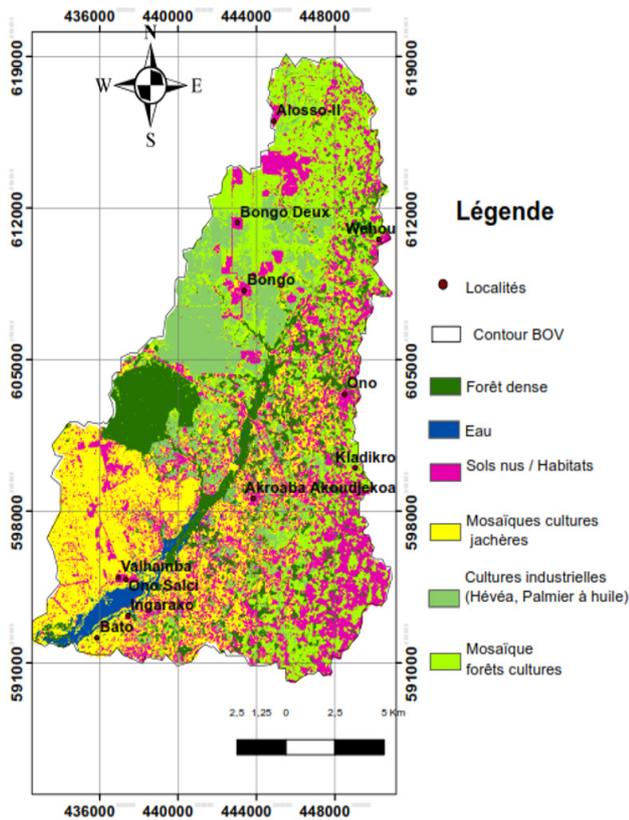


Figure 4: Carte d'occupation du sol du bassin versant de Ono

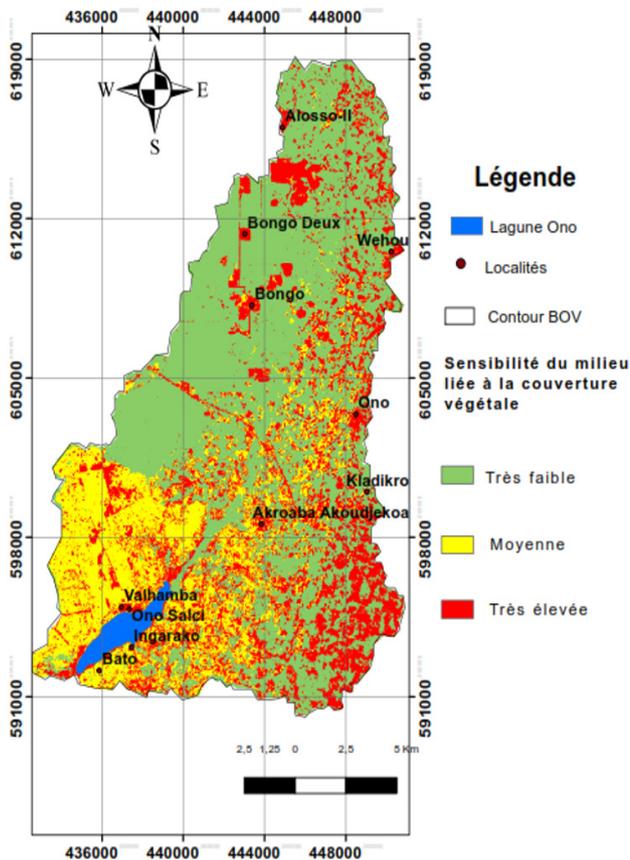


Figure 5: Carte de sensibilité du milieu liée à la couverture végétale du bassin versant de Ono

Sensibilité du milieu liée à l'érosivité de la pluie

La figure 6 présente la sensibilité du milieu liée à l'érosivité des pluies (R) sur le BVO. La partie Ouest et Nord-Ouest a une très faible sensibilité liée à l'érosivité des pluies. Les très fortes sensibilités sont observées au Nord-Est et au Sud-Est du BVO. La partie médiane du BVO présente des sensibilités faibles et moyennes tandis que les fortes sensibilités sont perçues à l'Est du BVO.

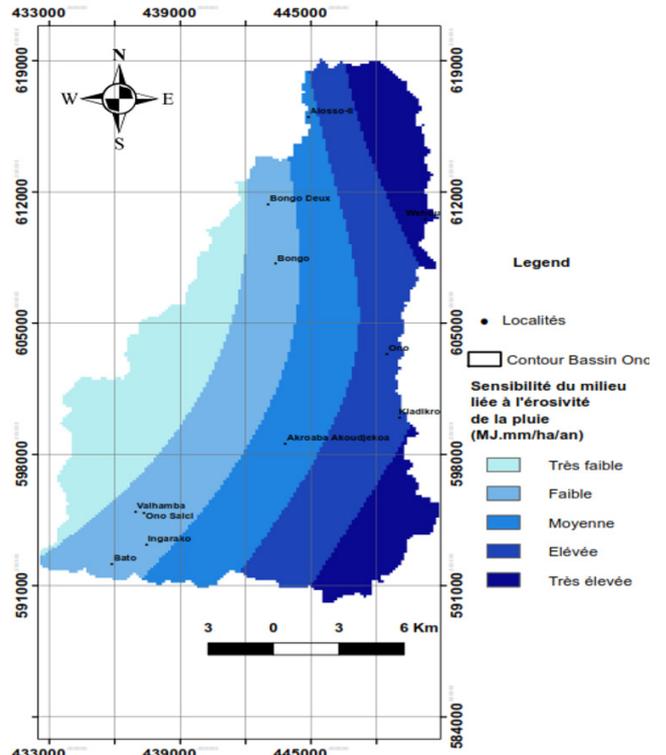


Figure 6: Carte de sensibilité liée à l'érosivité des pluies sur le bassin versant de Ono

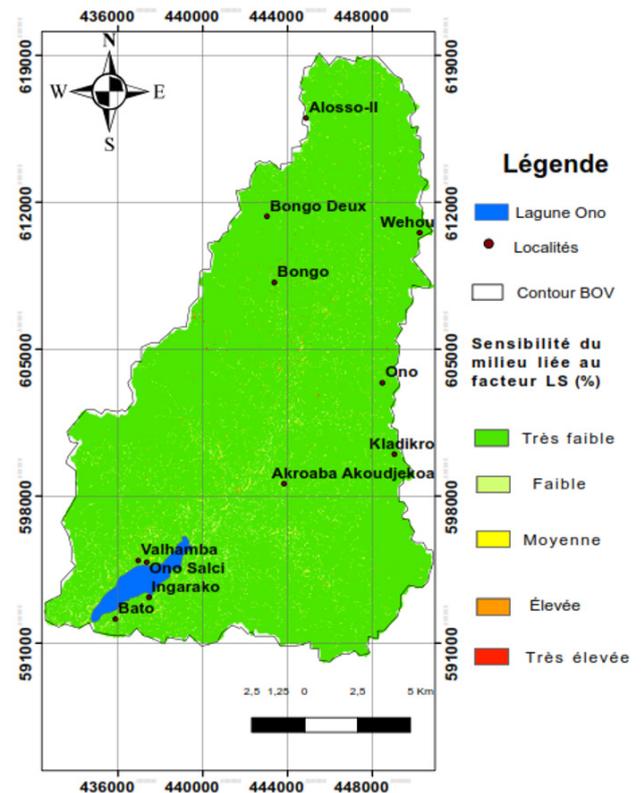


Figure 7: Carte de sensibilité du milieu liée au facteur de pente

Sensibilité du milieu liée au facteur de pente

Le BVO présente un facteur de longueur et d'inclinaison de pente (LS) très faible (< 15%) sur une superficie de l'ordre de 99,7% (Figure 7). Ainsi la sensibilité du BVO à l'érosion hydrique liée au facteur LS reste pratiquement la même sur tout le bassin.

Sensibilité du milieu liée à l'érodabilité des sols

La sensibilité du bassin versant de Ono liée à l'érodabilité des sols (K) est présentée par la Figure 8. La majeure partie du BVO (94,6%) a une sensibilité élevée à K (sable tertiaire fortement désaturé appauvri en argile). La partie centrale longeant la lagune Ono (5,42% du BVO) a une sensibilité très faible à l'érosion (sol hydromorphe).

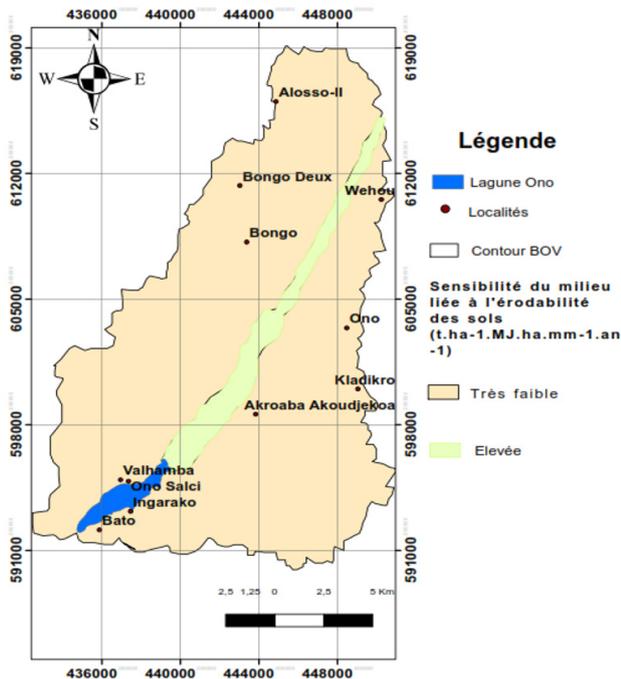


Figure 8: Carte de sensibilité du milieu liée à l'érodabilité des sols du bassin versant de Ono

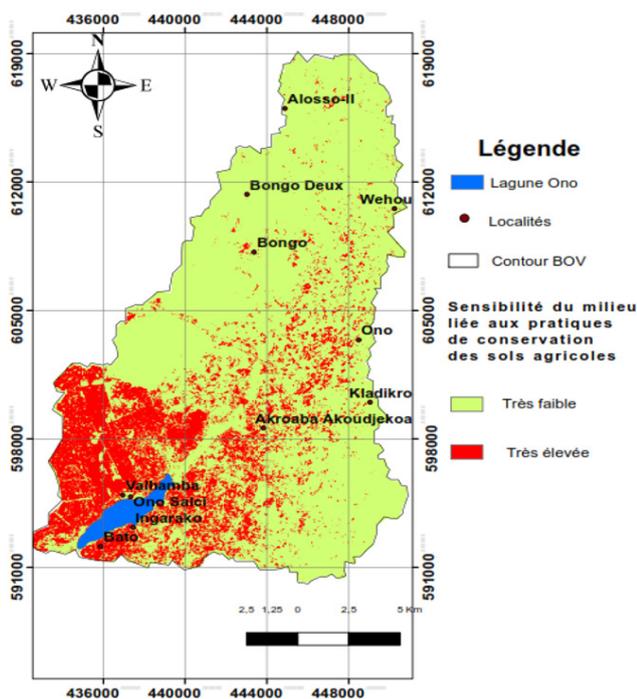


Figure 9: Carte de sensibilité du milieu liée aux pratiques de conservation des sols agricoles dans le bassin versant de Ono

Sensibilité du milieu liée aux pratiques de conservation des sols agricoles

La sensibilité du milieu liée aux pratiques de conservation des sols agricoles dans le bassin versant de Ono, présentée par la Figure 9, permet de montrer que plus de 22,0% de la superficie du BVO constituent des zones agricoles dont les sols ne sont pas très bien conservés. Elles sont localisées dans la partie Sud-Ouest et Centre du BVO (Ono-Salci, Bato, Akroaba Akoudjekoa). Les 78,0% de la superficie du BVO très peu sensible concernent les zones non agricoles (habitats et sols nus), la forêt dense de Bongo ainsi que les plantations d'hévéa et de palmier à huile qui constituent elles-mêmes des barrières à l'érosion hydrique.

Risques potentiels de transfert du nitrate vers les eaux de surface du BVO par l'érosion hydrique des sols

Les très faibles risques de transfert des nitrates vers les eaux de surface représentent 45,3% de la superficie du BVO (Figure 10). On les retrouve dans les zones de forêt dense et de mosaïque forêt culture. Les faibles risques de transfert des nitrates vers les eaux de surfaces par l'érosion hydrique des sols concernent 20,2% de la superficie du BVO. Ces zones représentent les sols nus et habitats presque disséminés partout sur le bassin versant. Les zones de vulnérabilités moyennes correspondent aux plantations industrielles d'hévéa et de palmier à huile de la zone de Bongo. Ces zones représentent 9,29% de la superficie du BVO. Les risques élevés, dont la classe occupe 25,20% de la superficie du BVO, s'observent aux Sud-Ouest du BVO dans les zones de culture d'ananas de Ono-Salci et localités environnantes.

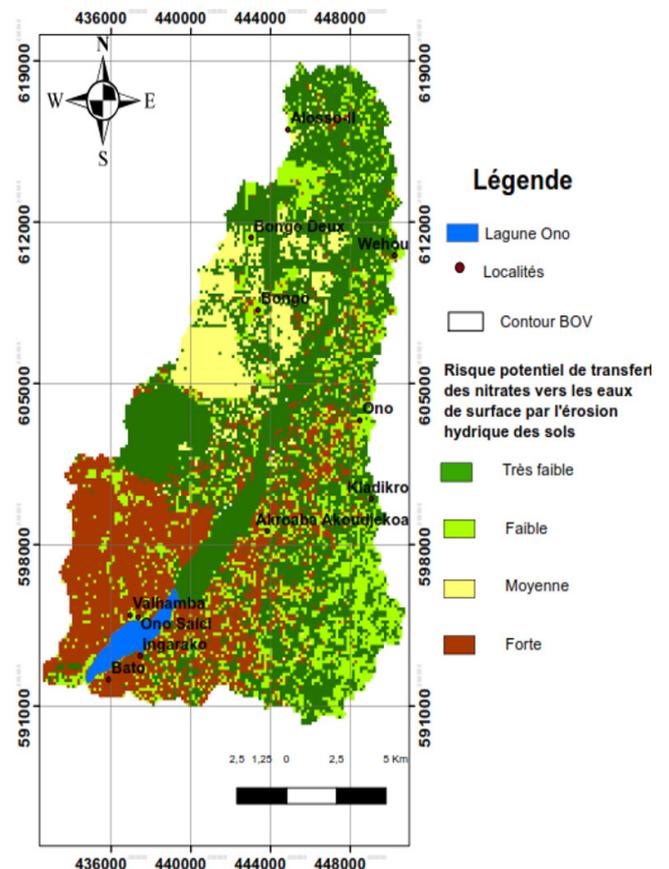


Figure 10: Carte de risques potentiels de transfert des nitrates vers les eaux de surface du bassin versant de Ono par l'érosion hydrique des sols

DISCUSSION

L'étude a mis en évidence l'évaluation des risques potentiels de contamination des eaux de surface par les nitrates dans le bassin versant de Ono (BVO) afin d'attirer d'avantage l'attention des décideurs et des acteurs sur le risque lié aux apports anthropiques de l'azote dans les zones agricoles. Ainsi, un modèle spatial, permettant l'évaluation du risque potentiel de contamination des eaux de surface par le nitrate sur le BVO, suivant la composante d'érosion hydrique des sols a été mis en œuvre. En effet, tous les indicateurs de sensibilité à l'érosion du BVO jouent des rôles plus ou moins importants dans le phénomène érosif. On peut remarquer que le bassin versant de Ono présente un facteur de longueur et d'inclinaison de pente (LS) très faible (comprises entre 0 et 8%) sur une superficie de l'ordre de 99,7%. A priori, elles ne présentent pas de vulnérabilité majeure au phénomène d'érosion hydrique des sols, car le ruissellement dans ces zones est aussi négligeable. Cela rend ainsi difficile le transport des polluants vers les eaux de surface. En effet, selon Jourda *et al.* (2007), les pentes faibles favorisent l'infiltration de tout contaminant présent, et les pentes élevées favoriseront le ruissellement de tout contaminant présent à la surface du sol vers les eaux de surface. Cependant, les études de Proffitt et Rose (1991) ont montré que même sur une pente inférieure à 1%, l'érosion peut se produire. Il s'agit d'une érosion en nappe avec quelques îlots répartis dans les endroits où les eaux de ruissellement ne parviennent pas à se concentrer. Aussi, le processus d'érosion dominant sur le BVO est le détachement pluvial occasionné par l'érosivité des pluies comme l'ont montré Ghadirri et Rose (1991) dans leur étude. L'érodabilité prononcée du type de sol rencontré sur la majeure partie du BVO excepté les zones se trouvant le long du cours d'eau principal du BVO joue un rôle prépondérant dans le phénomène d'érosion. Par ailleurs, selon Fournier (1967), en l'absence de couvert végétal, les caractères des horizons superficiels rencontrés sur le BVO joueraient un rôle primordial dans le déclenchement et le développement de l'érosion. Cependant, la distribution quasi uniforme sur l'ensemble du BVO de la plupart de ces indicateurs de sensibilité (facteur LS et érodabilité) à l'érosion ne permet pas d'apprécier leur contribution dans la distribution spatiale de la vulnérabilité du bassin. Par conséquent la vulnérabilité spatiale de l'érosion hydrique des sols serait dans le cas de notre étude liée essentiellement aux pratiques agricoles, à la couverture végétale, aux pratiques anti-érosives et à l'érosivité des pluies.

Le sol autour du BVO est occupé par plusieurs activités qui se déploient en couronne autour de la lagune Ono. L'essentiel de l'espace est occupé dans sa partie Sud-ouest (la zone de Ono-Salci) et Nord dans la zone de Bongo de Mosaïque cultures jachères (20,5%) et Cultures industrielles d'Hévéa et de Palmier à huile (29,1%). L'importante proportion des zones agricoles dans le BVO s'explique principalement par le fait que l'économie de la population rurale du pays et en particulier de cette zone est basée principalement sur les activités agricoles. De plus, l'amélioration des prix des principaux produits agricoles de la région tels que le palmier à huile et l'hévéa au cours des dernières années serait le moteur de l'expansion des surfaces cultivées par les agriculteurs et les producteurs de la région. La

vulgarisation agricole s'est également accompagnée de la fourniture de grandes quantités d'intrants agricoles tels que les engrais et les produits phytosanitaires aux agriculteurs et producteurs (Birkhaeuser *et al.*, 1991). Selon la carte des risques de pollution, la contamination des eaux de surface est très probable si des mesures urgentes ne sont pas prises par les décideurs. Les risques élevés de transfert des nitrates dont la classe occupe 25,2% de la superficie du BVO s'observent aux Sud-Ouest du BVO dans les zones de culture d'ananas de Ono-Salci, Bato et Ingarako. Cette situation pourrait s'expliquer par le fait que la pression polluante d'azote dans ces zones reste élevée ((InPrAzot >329 272 kg/an) à cause de l'utilisation forte d'azote dans les vastes plantations d'ananas. Ces mêmes observations ont été faites par Eba *et al.* (2016). Cela pourrait aussi expliquer le risque élevé de transfert des nitrates vers les eaux de surface du BVO. En effet, ces zones correspondent aux zones de mosaïque culture jachère représentée en majorité par les vastes plantations d'ananas de la Société de Culture et de développement de la Banane (SCB) dans la zone de Ono-SALCI. Ces zones ont une couverture végétale très faible et aucune pratique de conservation des sols n'est mise en place en vue de limiter l'érosion hydrique des sols. De même, les très fortes vulnérabilités à la pollution observées sur tout le BVO seraient dues au type de sol sableux facilement érodable. Les résultats de cette étude confirment ceux de Aké (2010) qui avait montré que les zones de culture d'hévéa et de forêt dense avaient une faible vulnérabilité à l'érosion hydrique dans la région de Bonoua tandis que les fortes vulnérabilités étaient observées au niveau des sols nus et habitats et au niveau des zones de culture d'ananas de Ono-SALCI. Par ailleurs, 45,3% de la superficie du BVO présente une très faible vulnérabilité au transfert des nitrates par l'érosion hydrique des sols. Ces zones sont constituées des mosaïques forêts cultures et de la forêt dense. Cette très faible vulnérabilité est due au fait que ces zones, en plus de n'être exposées à quasiment aucun apport d'engrais azoté, ont une vulnérabilité à l'érosion hydrique très faible due à la couverture végétale importante. EL Garouani *et al.* (2005), Le Bissonnais (2005), Coulibaly *et al.* (2007) et Akpo (2013) ont montré que la bonne couverture végétale assure la protection des sols contre l'énergie d'extraction des particules de sol par les gouttes de pluie. Cependant, un site avec un indice de vulnérabilité faible n'est pas à l'abri d'une contamination, mais un tel site est moins susceptible à la contamination par rapport à un site ayant un indice de vulnérabilité à la pollution élevée (Osborn *et al.*, 1998). Comme tout outil d'analyse, la méthode appliquée pour la modélisation spatiale du transfert des nitrates vers les eaux de surface du BVO a comporté certaines difficultés. En effet, le Système d'Information Géographique (SIG) a assuré une synthèse de plusieurs paramètres à travers une analyse multicritère. Cette synthèse a permis la réalisation d'une carte de risque de transfert des nitrates vers les eaux de surface de ce bassin. Cependant, pour Youan Ta (2008), l'utilisation des SIG révèle souvent de multiples problèmes liés à la qualité, au nombre souvent insuffisant des données, à leur interpolation et la notion de variabilité spatio-temporelle. Aussi, la difficulté dans la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution à l'aide d'un SIG réside-t-il de façon générale dans le nombre et la qualité des paramètres à prendre en

compte. La fiabilité (qualité des données souvent douteuse) et le nombre très limité des données ne permettent souvent pas une bonne évaluation spatiale des critères. En plus, comme remarqué par Eba *et al.* (2013), la subjectivité des poids et des cotes assignées aux paramètres dans l'application de l'analyse multicritère est un facteur limitant. De même, les valeurs attribuées aux paramètres ont parfois tendance à surestimer ou sous-estimer le degré de vulnérabilité de la ressource. Toutefois, l'approche géomatique appliquée a permis d'évaluer le risque de transfert des nitrates vers les eaux de surface de ce bassin. La prise en compte de plusieurs facteurs de transfert des nitrates vers les eaux de surfaces tel que le transfert par ruissellement, le transfert par érosion éolienne et le transfert des nitrates dû à la proximité des zones agricoles aux cours d'eau et à l'exutoire du bassin pourrait permettre d'obtenir des résultats décrivant au mieux le transfert des nitrates vers les eaux de surfaces du BVO.

CONCLUSION

La cartographie des zones de risques potentiels de transfert des nitrates vers les eaux de surface du bassin versant de Ono (BVO) a été élaborée à la suite du croisement d'un certain nombre de cartes d'indicateurs de sensibilité du milieu au transfert de la pollution ainsi que la carte de l'indicateur de pression polluante d'azote épandu.

Le but de ce travail était d'attirer d'avantage l'attention des décideurs et des acteurs sur les risques liés aux apports anthropiques d'azote dans les zones agricoles. Ainsi la carte de risque de transfert des nitrates vers les eaux de surface obtenue révèle que 25,2% de la superficie du BVO présente des risques élevés de transfert de nitrates vers les eaux de surfaces dus aux fortes pressions anthropiques (labour des terres, épandage d'engrais) exercées dans ces zones. Ces zones, se trouvant à proximité de la lagune Ono, pourraient affecter considérablement la qualité de celle-ci. Par ailleurs, 65,5% de la superficie du BVO présente des risques de transfert des nitrates vers les eaux de surface faibles (20,2%) et très faibles (45,3%) du fait de la forte couverture végétale et de l'épandage d'engrais très faible dans ces zones. Les risques moyens représentent 9,29% du BVO et sont perçus au niveau des plantations d'hévéa et de palmier à huile de Bongo qui ont une bonne couverture végétale, mais utilisent également de l'engrais azoté, d'où la vulnérabilité moyenne au transfert des nitrates. Ainsi cette méthode de modélisation spatiale utilisée dans le cadre de cette étude permet de simuler facilement les risques de transfert de nitrates vers les eaux de surface du BVO. Cependant, la prise en compte des autres facteurs de transfert des nitrates pourrait permettre d'avoir des résultats plus probants. Aussi, certes les classes de risques faibles et très faibles dominant sur le BVO, mais cela n'exclut pas la prise en compte de mesures de contrôle du transfert du nitrate dans les ressources en eau telles que toutes les activités à risque comme les installations ou extensions de plantations à l'approche de la lagune et des cours d'eau du bassin. En somme, toutes activités inhérentes à la production de contaminant doivent être réglementées ou interdites.

RÉFÉRENCES

- Aké G. E. (2001). Évaluation des ressources en eau souterraine de la région de Bonoua. Mémoire de DEA des sciences de la terre, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 72 p.
- Aké G. E. (2010). Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat Unique, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 200 p.
- Akpo K. S. (2013). Application de la géomatique à l'identification des zones vulnérables à la pollution: cas du bassin versant de la Marahoué, côte d'ivoire. Thèse de Doctorat des sciences et gestion de l'environnement option Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 176 p.
- Anoh K. A., Jourda J. P., Kouamé K. J., Koua T. J. J., Eba A., E. Gabriel L. (2012). Demarcation of protection perimeters for surface waters of Taabo (Côte d'Ivoire) watershed using GIS and multicriteria analysis. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11: 2123-2131.
- Antoni J. P., Klein O., Moisy S. (2002). La discrétisation temporelle. Une méthode de structuration des données pour la cartographie dynamique. *Carte et géomatique*, 213: 27-31.
- Birkhauser, D., Evenson R.E. and F. Gershon (1991). The Economic Impact of Agricultural Extension: A Review. *Economic Development and Cultural Change*, 39: 607-650.
- Christine, T. (2001). Diagnostic du risque de pollution des eaux superficielles par les produits phytosanitaires: Typologie des bassins versants du beaujolais viticole. Mémoire de fin d'études, École Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux.
- Corpen G. (2007). Les fonctions environnementales des zones tampons, les bases scientifiques et techniques des fonctions de protection des eaux. Rapport, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'aménagement du territoire et Ministère de l'agriculture et de la pêche, Paris, France, 176 p.
- Costa, J.L., Massone, H., Martinez, D., Suero, E. E., Vidal, C. M., Bedmar, F. (2002). Nitrate contamination of a rural aquifer and accumulation in the unsaturated zone. *Agricultural Water Management*, 57: 33-47.
- Coulibaly N., Goula B. T. A., Coulibaly L., Savané I. (2007). Modélisation spatio-temporelle de l'érosion hydrique à partir de la méthode USLE en zone de savane tropicale humide: cas du Bassin versant du Baoulé (Côte d'Ivoire). *European Journal Scientific Research*, 16: 213-221.
- Eba A. E., Kouame K. J., Jourda J. P., Ake G. E., Saley M. B., Anoh K. A., Deh S. K. (2013). Demarcation of Surface Water Protection Perimeters by Using GIS: Case of Gagnoa Reservoir in West Central of Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 4: 1311-1320.
- Eba A. E., Kouame K. J., Jourda J. P., Saley M. B., Anoh K. A., Deh S. K., Touré M., Balliet R. (2016). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution d'une eau de surface destinée à l'adduction d'eau potable d'une métropole. Cas de la Lagune Aghien à Abidjan, (Sud de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12: 1857- 7431.
- Effini A.T. (2007). Évaluation de la qualité chimique et bactériologique de la nappe de Bonoua et contribution à la protection de la nappe. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 73 p.
- El Garouani A., Merzouk A., Jabrane R., Boussema M. R. (2005). Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le pré-rif marocain. *Télétection*, 5: 69-80.
- El Ouali Lalami, A., Merzouki, M., El Hillali, O., Maniar, S., Koraichi, I. (2014). Pollution des eaux de surface de la ville de Fès au Maroc: Typologie, origine et conséquences. *Larhyss Journal*, 9: 55-72.
- Engel B. (2003). Estimating soil erosion using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) using Arcview.

- Eyi A. J., Konan K. J., Tano K., N'da K., Atse B. (2016). Étude préliminaire des communautés ichtyofauniques de la lagune Ono (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 104: 9894-9903.
- Fournier F. (1967). Les facteurs de l'érosion du sol par l'eau; les recherches sur la conservation du sol en Afrique et Madagascar. *Sols africains*, 12: 6-51.
- Fox D. E., Stieve I., Valiela J. Hauxwell E., McClelland J. (2008). Macrophyte abundance in Waquoit Bay: Effects of land-derived nitrogen loads on seasonal and multi-year biomass patterns. *Estuaries and Coasts*, 31: 532-541.
- Ghadiri H., Rose C. W. (1991). Sorbed chemical transport in over-land flow: II. Enrichment ratio variation with erosion processes. *Journal of Environmental Quality*, 20: 634-641.
- Hansen B. Thorling L., Dalgaard T., Erlandsen M. (2010). Trend reversal of nitrate in Danish groundwater- a reflection of agricultural practices and nitrogen surpluses since 1950. *Environmental Science and Technology*, 45: 228-234.
- Jourda J. P., Kouassi K. J., Adja M. G., Deh S. K., Anani A. T., Effini A. T., Biemi J. (2007). Évaluation du degré de protection des eaux souterraines: vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. Acte de conférence Francophone ESRI, Versailles, 18 p
- Le Bissonnais Y., Daroussin J., Jamagne M., Lambert J.-J., Le Bas C., King D., Cerdan O., Léonard J., Bresson L. M., Jones R. J. A. (2005). Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Data base using pedotrans ferrules. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, 2: 1-15.
- Mariotti A. (1994). Denitrification *in situ* dans les eaux souterraines, processus naturels ou provoqués: une revue. *Hydrogéologie* (Orléans), 3: 43-68.
- MEMA (2001). Recensement national de l'agriculture, analyse des données, niveau national. Direction des Statistiques, de la Documentation et de l'Informatique, rapport, 90 p.
- Mitasova H., Mitas L. (1999). Modeling Soil Detachment with RUSLE Using GIS. Geographic Modelling Systems Laboratory, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA, 57 p.
- Osborn N. I., Eckenstein E., Koon K. Q. (1998). Vulnerability assessment of twelve major aquifers in Oklahoma. *Oklahoma Water Resources Board, technical report*, 14 p.
- Perraud A., De la Souchere P. (1970). Carte de l'Esquisse Pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500 000 (feuille Sud-Est, Ministère de l'Agriculture), 3 p.
- Proffitt A. P. B., Rose C. W. (1991). Soil erosion processes. II. Setting velocity characteristics of eroded sediment. *Soil Research*, 29: 685-695.
- Rosi, S., Stamm, C., Reichert P. (2009). Modeling Potential Herbicide Loss to Surface Waters on the Swiss Plateau. *Journal of Environmental Management*, 91: 290-302.
- Wischmeier W. H., Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. US Department of Agriculture, *Agriculture handbook*, 537, 58 p.
- Youan Ta M (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest: cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 237 p.