

## **Cartographie des zones à risques de pollution par les pesticides de la retenue d'eau destinée à l'alimentation en eau potable dans le département de Katiola, Côte d'Ivoire**

**Oumar COULIBALY<sup>1\*</sup>, Serge Kouakou DEH<sup>2</sup>, Abou TRAORÉ<sup>3</sup>, Kan Jean KOUAMÉ<sup>2</sup>  
et Kouakou Édouard N'GUESSAN<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Langues, Littératures et Civilisations, Laboratoire de Développement Durable de la Chaire UNESCO pour la culture de la paix, BP 1711 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>3</sup> *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences de la terre et des ressources Minières, Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux, BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>4</sup> *Université Félix Houphouët - Boigny, UFR de Biosciences, Laboratoire de Botanique, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 07 Novembre 2022 ; Accepté le 12 Janvier 2023)

---

\* Correspondance, courriel : [oum\\_coul@yahoo.fr](mailto:oum_coul@yahoo.fr)

### **Résumé**

La retenue d'eau destinée à l'alimentation en eau potable dans le département de Katiola est de plus en plus exposée à la pollution d'origine agricole. La présente étude vise à cartographier les zones potentielles à risques de pollution agricole par les pesticides du bassin d'alimentation. L'approche méthodologique a consisté à évaluer la vulnérabilité du milieu et la pression pesticide exercée sur la retenue d'eau selon un modèle d'analyse multicritère puis intégré dans un système d'information géographique (SIG). Elle a nécessité la pondération de cinq paramètres de vulnérabilité (pente, ruissellement, occupation du sol, densité de drainage, types de sol) et cinq paramètres de pression pesticide (charge, toxicité, rémanence, solubilité, mobilité). Les résultats obtenus indiquent cinq niveaux de risques à savoir : un risque très faible occupant 23,32 km<sup>2</sup>, soit 29 % de la superficie du bassin ; un risque faible occupant 25,58 km<sup>2</sup>, soit 31 % de la superficie du bassin ; un risque moyen occupant 12,43 km<sup>2</sup>, soit 15,5 % de la superficie, un risque élevé occupant 15,55 km<sup>2</sup>, soit 19 % et un risque très élevé, occupant 4,25 km<sup>2</sup> du bassin, soit 5,5 %. Les résultats de cette étude constituent un outil d'aide à la décision dans la mise en place des périmètres de protection autour des cours d'eau et les plans d'atténuation des risques de pollution.

**Mots-clés :** *cartographie, risque de pollution, pesticide, Katiola, Côte d'Ivoire.*

## Abstract

### **Mapping of pesticide pollution risk areas in the water reservoir intended for drinking water supply in the department of Katiola, Côte d'Ivoire**

The water reservoir intended for drinking water supply in the department of Katiola is increasingly exposed to pollution of agricultural origin. This study aims to map the potential areas at risk of agricultural pollution by pesticides in the watershed. The methodological approach consisted in assessing the vulnerability of the environment and the pesticide pressure exerted on the water reservoir according to a multi-criteria analysis model then integrated into a geographic information system (GIS). It required the weighting of five vulnerability parameters (slope, runoff, land cover, drainage density, types of soil) and five pesticide pressure parameters (load, toxicity, persistence, solubility, mobility). The results obtained indicate five levels of risk, namely : a very low risk occupying 23.32 km<sup>2</sup> or 29 % of the watershed's area, a low risk occupying 25.58 km<sup>2</sup> or 31 % of the area, a medium risk occupying 12.43 km<sup>2</sup> or 15.5 % of the area, a high risk occupying 15.55 km<sup>2</sup> or 19 % and a very high risk occupying 4.25 km<sup>2</sup> of the basin or 5.5 %. The results of this study constitute a decision-making tool for setting up protection perimeters around watercourses and pollution risk mitigation plans.

**Keywords :** *mapping, pollution risk, pesticide, Katiola, Côte d'Ivoire.*

## 1. Introduction

L'accès à l'eau potable est devenu un enjeu majeur pour l'humanité et s'inscrit dans les objectifs du millénaire pour le développement. Chaque année l'insalubrité de l'eau tue au moins 1,6 millions d'enfants âgés de moins de cinq ans [1]. La majorité des personnes vivant en Afrique subsaharienne n'ont toujours pas accès à une eau salubre [2]. Avec une démographie galopante et une agriculture de plus en plus exigeante, les besoins en eau ne cessent d'augmenter alors que les ressources demeurent limitées et de plus en plus polluées [1]. La Côte d'Ivoire, malgré sa vision d'un taux de 100 % d'accès à l'eau potable d'ici à 2030 [3], connaît des perturbations liées aux contraintes agricoles. Les mauvaises herbes, les maladies et les ravageurs des cultures causent des dégâts considérables, pouvant engendrer des pertes estimées à un tiers de la production [4]. Pour y faire face, la forte utilisation des pesticides est considérée comme un préalable au développement du secteur agricole. Cette conception favorise l'utilisation abusive des pesticides. Plusieurs études ont mis en évidence le non-respect des bonnes pratiques agricoles en matière de pesticides [5, 6]. Ces faits témoignent de la gestion non sécurisante des pesticides avec comme corollaire des risques graves pour les ressources en eau. C'est le cas de la retenue d'eau du département de Katiola destinée à l'alimentation en eau potable des populations dont les besoins journaliers s'élèvent à 3000 m<sup>3</sup>. Le nombre d'exploitants agricoles autour des cours d'eau alimentant la retenue est passé de 12 en 2013 à 38 en 2020. Les superficies exploitées quant à elles, sont passées de 5 à 15 hectares [7]. La présence de pesticides a été signalée dans plusieurs puits de la localité [8]. Cette situation présente des risques sanitaires avec des effets cancérigènes et endocriniens sur la population [9]. Selon [10], le traitement d'une eau brute de mauvaise qualité est très exigeant en matière d'équipements, de fonctionnement et d'entretien. Les traitements curatifs ne sauraient donc être une solution durable. Cette retenue qui ne bénéficie d'aucune protection est menacée par la pollution agricole diffuse liée à l'utilisation des pesticides. Cette étude se propose de cartographier les zones potentielles à risques en fonction de la vulnérabilité de la zone et des pratiques agricoles où les mesures d'atténuation et de protection des cours d'eau doivent être prioritaires.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Zone d'étude

Le département de Katiola, d'une superficie de 9454 km<sup>2</sup>, est composé des communes de Katiola, de Fronan et de Timbé. Il est situé en zone de socle, UTM Nord entre les longitudes 4°45' et 5°37' Ouest et les latitudes 7°57' et 8°28' Nord au Centre-nord de la Côte d'Ivoire, dans la Région du Hambol (*Figure 1*). Les formations géologiques appartiennent au birimien ou encore paléoprotérozoïque [11]. La zone est essentiellement constituée de granites, de schistes et de roches indifférenciées auxquelles s'ajoutent quelques intrusions d'andésites, spilites, basaltes, amphibolites, granodiorites. Le relief est formé d'un plateau granitique peu accidenté avec quelques collines à altitude variant entre 200 et 370 m dont le point culminant est le mont Hambol. La végétation, de type savane, pousse sur des sols ferrallitiques remaniés. La population, estimée à 162472 habitants (RGPH, 2021) est alimentée en eau potable par sa principale retenue d'eau de 0,36 km<sup>2</sup>. Son bassin d'alimentation, d'une superficie de 118 km<sup>2</sup>, a pour cours d'eau principal, un affluent permanent du Bandama, « le Ouango ». La retenue est alimentée par ce cours d'eau permanent et d'autres non permanents qui disparaissent en saison sèche. Avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1094,4 mm, le régime des cours d'eau est étroitement lié à la variation des précipitations. Le régime hydrologique est du type équatorial de transition atténué [12]. L'activité agricole occupe une place de choix dans l'économie locale. L'agriculture est basée sur les cultures d'exportation de coton et d'anacarde qui constituent les principales cultures de rente. À ces cultures s'ajoutent d'autres spéculations agricoles émergentes telles que l'igname, le maïs, le manioc, le riz, l'aubergine, la tomate, le gombo et le piment. Dans toutes les parcelles agricoles du département, les agriculteurs font usage de pesticides pour un meilleur rendement.

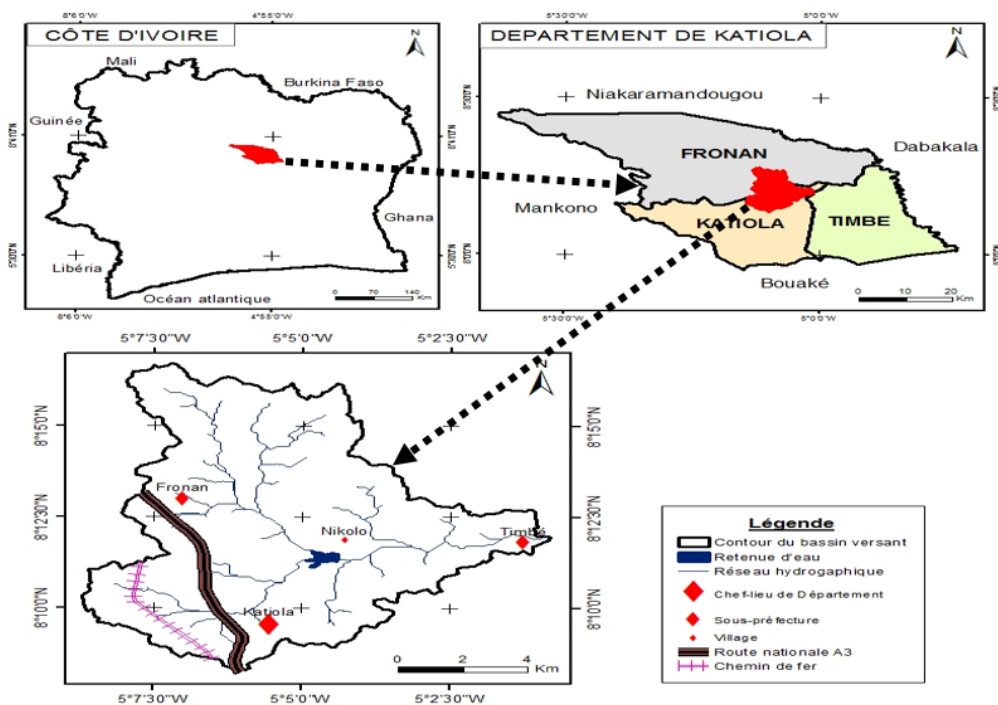


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

### 2-2. Matériel

Le matériel se compose de données cartographiques, de données satellitaires, de données climatiques et de données agricoles.

### **2-2-1. Données cartographiques**

Les données cartographiques sont composées de :

- Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 30 m de la Côte d'Ivoire issu de l'image satellitaire SRTM pour la carte des pentes, du réseau hydrographique et de la densité de drainage ;
- L'esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/500000 pour établir la carte pédologique de Katiola.

### **2-2-2. Données satellitaires**

Une image satellitaire LANDSAT 8 Operational Land Imager (OLI) de la scène 197-054 acquise le 13/12/2019 sur Earth explorer pour établir la carte de l'occupation du sol.

### **2-2-3. Données climatiques**

Les données climatiques sont obtenues à partir de relevés climatiques journaliers de 2013 à 2018 de la Direction Régionale de l'Agriculture et du Développement Rural Hambol et de la SODEXAM. Elles ont permis l'estimation du ruissellement annuel.

### **2-2-4. Données agricoles**

Les données agricoles sont recueillies auprès des agriculteurs, des revendeurs de produits pesticides et de la Direction Régionale de l'Agriculture et du Développement Rural à l'aide de questionnaires et de guides d'entretien. Les informations sur les caractéristiques des matières actives de pesticides sont obtenues à l'aide de l'index phytosanitaire [13] et à partir de la base des données [14].

## **2-3. Méthodes**

La méthodologie utilisée pour la détermination du risque potentiel de pollution agricole des eaux de surface est de considérer le risque comme un indicateur composite spatialisé. Son évaluation a consisté à la combinaison dans un SIG de tous les indicateurs contribuant à la pollution agricole diffuse. Le potentiel de risque est obtenu par la conjonction de la vulnérabilité liée aux caractéristiques physiques du milieu et la pression pesticide inhérente aux pratiques agricoles. Il s'agit de combiner les indicateurs de la vulnérabilité et ceux de la pression pesticide pour établir la carte de risques.

### **2-3-1. Évaluation de la vulnérabilité de la retenue d'eau**

La vulnérabilité est évaluée à partir de l'analyse multicritère AHP (Analytic Hierarchy Process). La méthode AHP permet de définir l'impact des paramètres recensés dans la pollution [15]. Le principe de fonctionnement de cette méthode se résume en quatre grandes étapes : l'identification et la reclassification des paramètres, la hiérarchisation, la pondération et la spatialisation des zones de vulnérabilité.

#### **2-3-1-1. Identification, reclassification et cotation des paramètres**

Les paramètres de vulnérabilité retenus sont : le ruissellement (R), la pente (P), l'occupation du sol (O), la densité de drainage (D) et le type de sol (S). Ils sont choisis en fonction de leur influence sur le mécanisme de pollution et de leur disponibilité dans la base de données cartographique nationale. Pour une meilleure utilisation, ces paramètres ont été reclassifiés. Des cotes ont été attribuées aux différentes classes à partir de l'outil « Reclassify » du logiciel ArcGIS. Le **Tableau 1** montre les classes et les cotes attribuées aux différents paramètres.

**Tableau 1 : Classification et cotation des différents paramètres de vulnérabilité**

Paramètre	Classe	Cote
Ruissellement (mm)	504	3
	< 3	1
Pente (%)	3 - 7	2
	> 7	3
Occupation du sol	Forêt décidue	1
	Eau	2
	Habitats / Sols nus	3
	Mosaïque cultures / Jachère	4
Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	< 1	1
	1 - 2	2
	> 2	3
Type de sol	Sol ferrallitique remanié	2

**2-3-1-2. Hiérarchisation**

La hiérarchisation consiste à établir une matrice carrée réciproque issue de la comparaison des différents paramètres pris deux à deux. La matrice obtenue est représentée par le **Tableau 2**.

**Tableau 2 : Matrice originale normalisée**

	R	P	O	D	S	Total ligne
R	0,50	0,63	0,40	0,38	0,35	2,25
P	0,17	0,21	0,40	0,3	0,25	1,32
O	0,17	0,07	0,13	0,23	0,2	0,79
D	0,10	0,05	0,04	0,08	0,15	0,42
S	0,07	0,04	0,03	0,03	0,05	0,22
Total colonne	1	1	1	1	1	5

**2-3-1-3. Pondération des paramètres**

La pondération revient à déterminer le coefficient de pondération. Le coefficient de pondération (Cp) se calcule à partir de la **Formule** mathématique suivante :

$$Cp = \frac{Vp}{\sum Vp} = \frac{Vp}{Vp1+Vp2+\dots+Vpk} \tag{1}$$

Vp étant le vecteur propre de chaque élément comparé. Il est déterminé par l'**Équation** suivante :

$$Vp = \sqrt[k]{w1 \times w2 \times w3 \dots \times wk} \tag{2}$$

w1, w2, ... wk étant les valeurs attribuées aux paramètres lors de leur comparaison et k le nombre de paramètres comparés.

Ces différentes étapes permettent de déterminer le coefficient de pondération des différents paramètres. Le **Tableau 3** indique les poids obtenus après calcul.

**Tableau 3 : Poids des différents paramètres retenus**

Paramètres retenus	Poids ou coefficient de pondération
Ruissellement (R)	0,46
Pente (P)	0,26
Occupation du sol (O)	0,15
Densité de drainage (D)	0,08
Type de sol (S)	0,05

#### 2-3-1-4. Spatialisation des zones de vulnérabilité

La méthode choisie pour la combinaison des couches dans le SIG est celle de l'approche opérationnelle du critère unique de synthèse de [16]. Pour chaque paramètre, le poids (Cp) est multiplié par les différentes cotes correspondantes. Les différentes couches sont ensuite additionnées selon leur importance. La probabilité que la vulnérabilité dans une zone soit élevée sera donc liée aux valeurs des classes des paramètres qui se croisent. Ainsi le calcul de l'indice de vulnérabilité se fait par **l'Équation 3** avec l'outil « Raster Calculator » du module « Map Algebra » du logiciel ArcGIS.

$$Iv = (0,46 * R) + (0,26 * P) + (0,15 * O) + (0,08 * D) + (0,043 * S) \quad (3)$$

#### 2-3-2. Évaluation de la pression pesticide exercée sur la retenue d'eau

La détermination des indicateurs de la pression pesticide s'effectue à travers l'évaluation de la quantité des produits utilisés dans les parcelles agricoles. À partir des doses utilisées, il est possible d'estimer la quantité et la qualité de matières actives à l'aide de l'index phytosanitaire de la base des données [10]. Dans cette base, à chaque donnée est attribuée un code et une note de qualité allant de 1 (faible) à 5 (élevée). Dans le cadre de cette étude, nous avons tenu compte de deux indicateurs pour l'évaluation de la pression pesticide. Il s'agit de l'indicateur de nuisance et l'indicateur de la charge de matières actives de chaque parcelle.

##### 2-3-2-1. Indicateur de nuisance

###### 2-3-2-1-1. Identification, reclassification et cotation des paramètres

L'indicateur de nuisance regroupe quatre paramètres caractéristiques des pesticides. Il s'agit de la toxicité, la solubilité, la rémanence et la mobilité. Les classes retenues et les notes attribuées, en rapport avec la variabilité des paramètres de la zone d'étude sont établies à partir des travaux de recherche existants [17, 18]. Le **Tableau 4** récapitule les classes et les cotes attribuées aux différents paramètres dans l'évaluation de la nuisance pesticide.

**Tableau 4 :** Classification et cotation des différents paramètres dans l'évaluation de la nuisance pesticide

Paramètres	Classes	Cotes
Toxicité	Très peu toxique	1
	Peu toxique	2
	Toxique	3
	Très toxique	4
	Extrêmement toxique	5
Solubilité	Insoluble	1
	Peu soluble	2
	Soluble	3
	Très soluble	4
Rémanence	Non persistant	1
	Peu persistant	2
	Persistant	3
	Très persistant	4
Mobilité	Non mobile	1
	Peu mobile	2
	Mobile	3
	Très mobile	4

2-3-2-1-2. Calcul de l'indice de nuisance

Le calcul de l'indice de nuisance s'effectue en faisant la somme des cotes des indicateurs de toxicité, de solubilité, de rémanence et de mobilité pour chaque molécule selon la **Formule** mathématique suivante :

$$INma = \sum It + Is + Ir + Im \tag{4}$$

*INma* étant l'indice de nuisance de matières actives, *It* l'indice de toxicité, *Is* l'indice de solubilité, *Ir* l'indice de rémanence et *Im* l'indice de mobilité.

2-3-2-1-3. Pondération des indices

La pondération consiste à donner aux valeurs des indices de nuisance des poids différents, en fonction des critères qui rendent compte de l'importance relative de chacun des éléments. À partir de la sommation des valeurs des indices, allant de 4 (lorsque la matière active n'est pas dangereuse) à 16 (lorsque la matière active est très dangereuse), nous attribuons des coefficients de pondération à quatre classes de même amplitude prédéfinies. En se référant aux travaux de [17], le premier coefficient de pondération est fixé à 1 pour le premier intervalle et pour le passage d'un intervalle à l'autre on ajoute 0,5. Les classes des intervalles et les coefficients de pondération correspondant sont répartis dans le **Tableau 5**.

**Tableau 5 :** Classes et coefficients de pondération de l'indice de nuisance

Classes	[4 - 7[	[7 - 10[	[10 - 13[	[13 - 16[
Coefficients	1	1,5	2	2,5

2-3-2-2. Charge de matières actives des parcelles

La charge de matières actives (*Cma*) prend en compte la dose de matières actives épandue sur la parcelle agricole, la surface de la parcelle traitée et la concentration de la matière active dans les produits. Ces informations sont obtenues à partir des fiches techniques de chaque produit utilisé. Le calcul de la charge de matières actives des parcelles se fait par **l'Équation** suivante :

$$Cma = D * C * S \quad (5)$$

*Cma* étant la charge de matière active exprimée en g, *D* la dose de matière active épandue exprimée en L.ha<sup>-1</sup> ou en kg.ha<sup>-1</sup>, *C* la concentration de la matière active exprimée en g.L<sup>-1</sup> ou en g.kg<sup>-1</sup> et *S* la surface traitée exprimée en ha.

### 2-3-2-3. Calcul de l'indice et échelle de pression pesticide

La détermination de l'indice de pression pesticide de chaque zone de pollution résulte de la combinaison du coefficient de pondération (*Cp*) et de la charge de matières actives (*Cma*). Il est calculé sur la base de la **Formule** suivante :

$$ICma = Cma * Cp \quad (6)$$

*ICma* étant l'indice de contribution à la pression pesticide et *Cp* le coefficient de pondération.

Pour la détermination de la contribution de chaque parcelle à la pollution pesticide, les valeurs obtenues sont traduites en classes en fonction des indices contributives. Les limites des classes d'intervalles sont établies à partir d'une enquête effectuée auprès d'experts. Les résultats sont comparés aux données établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2019). Ainsi, la répartition des parcelles par classe d'indice conduit à l'estimation de leur échelle d'influence à la contribution pesticide. Le **Tableau 6** indique les intervalles d'indices calculés et les échelles d'influence de pression pesticide.

**Tableau 6 : Indices et échelle de contribution à la pression pesticide**

Indices calculés	Échelle d'influence
< 50000	Très faible
50000 – 100000	Faible
100001 – 150000	Moyenne
150001 – 200000	Élevée
> 200000	Très élevée

### 2-3-2-4. Spatialisation de la pression pesticide

Les différentes données d'indice sont saisies et calculées directement dans des tables Excel de Microsoft Office selon les coordonnées géo-spatiales des parcelles agricoles. Après conversion en format xls, elles sont traitées dans l'environnement ArcGIS. L'interpolation avec l'outil « Krigeage » de ArcToolBox permet de les spatialiser.

### 2-3-3. Évaluation du risque potentiel de contamination de la retenue d'eau

Cette étape consiste à localiser et à spatialiser les zones à la fois vulnérables au transfert des pesticides et exposées aux charges des matières actives. Il s'agit d'obtenir un indice de risque global combinant la vulnérabilité et la pression pesticide. La combinaison s'effectue par une superposition issue du croisement de la couche de vulnérabilité avec celle de la pression pesticide. La démarche adoptée ne tient pas compte d'une hiérarchisation entre facteurs. Dans ce cas la vulnérabilité et la pression pesticide ont des poids équivalents. Le choix de la multiplication des couches a été privilégié à celui de l'addition pour établir la carte des zones potentielles à risques. Ainsi les zones n'ayant subi aucun traitement, ont un potentiel de risque nul. La



combinaison des couches en mode « Raster » est obtenue à partir de l'outil « Raster Calculator » du module « Spatial Analyst » du logiciel ArcGIS. Le modèle est établi suivant *l'Équation 7*.

$$[Risque\ potentiel] = [Vulnérabilité] * [Pression\ pesticide] \quad (7)$$

**2-3-4. Validation de la carte de risque potentiel à la pollution pesticide**

Le bassin versant du département de Katiola est composé de trois sous-bassins versants, mais seulement deux alimentent la retenue d'eau. La validation s'est effectuée en prenant en compte deux zones à risques élevés et les cours d'eau les plus proches qui leurs sont directement rattachés. Un prélèvement est effectué dans chacun des sous-bassins d'alimentation, suivi de leur analyse chimique en composants pesticides. Les résultats de l'analyse ont permis d'établir une correspondance entre le degré de risque et la présence effective de pesticides dans l'eau.

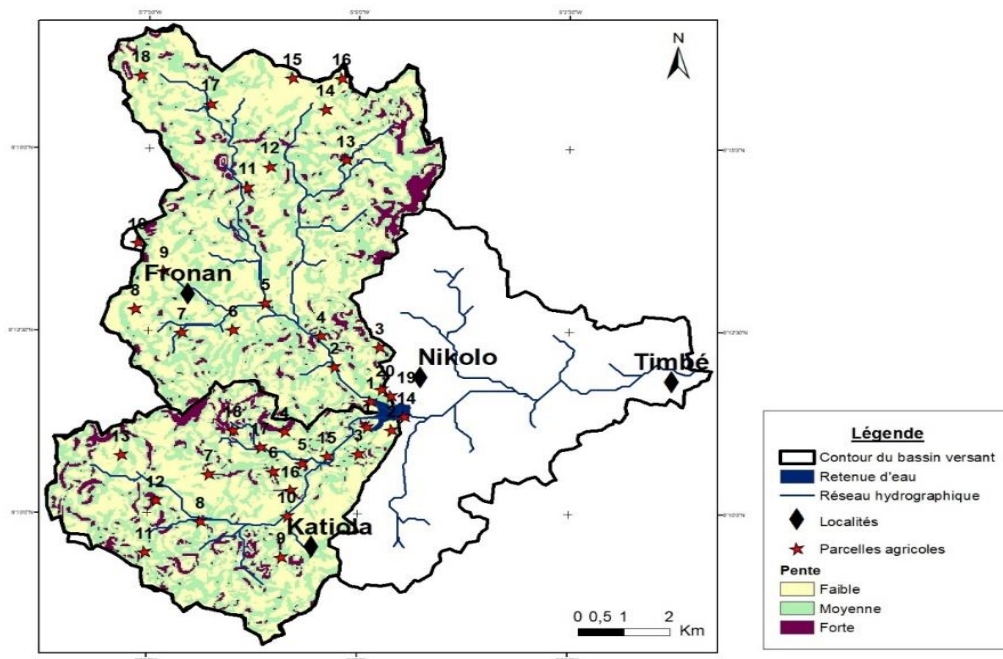
**3. Résultats**

**3-1. Cartographie de la vulnérabilité de la retenue d'eau**

**3-1-1. Paramètres contributifs**

**3-1-1-1. Pente du bassin d'alimentation**

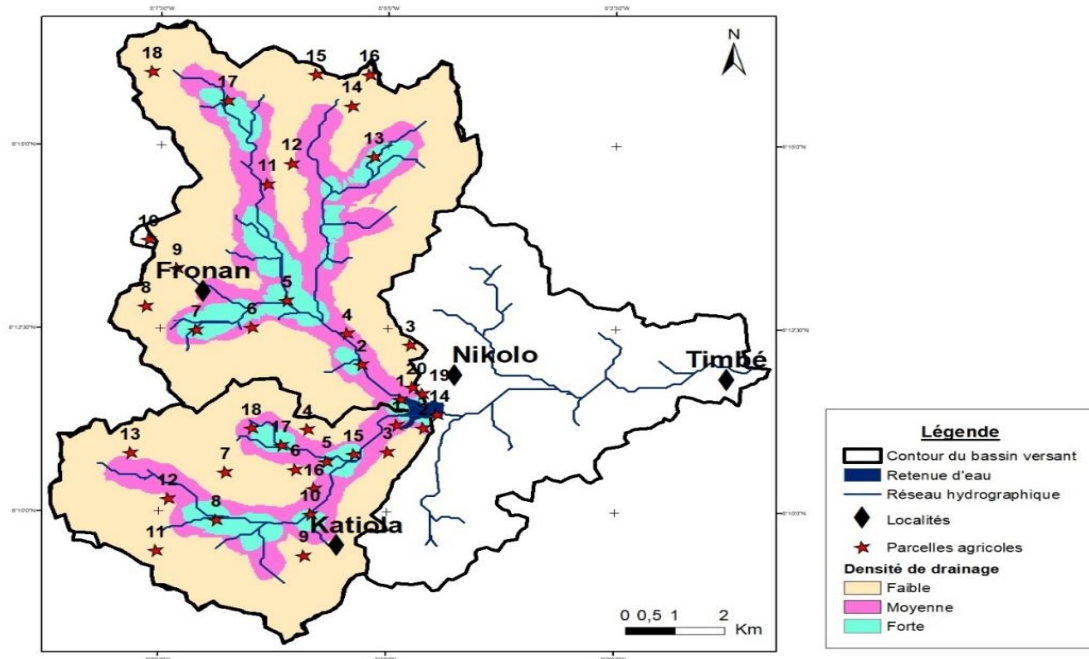
La carte des pentes du bassin d'alimentation de la retenue d'eau (*Figure 2*) montre l'existence de pentes faibles, moyennes et fortes. Il existe une prédominance des pentes faibles (inférieur à 3 %) et moyennes (entre 3 % et 7 %). Dans ces zones, l'écoulement superficiel et le ruissellement sont modérés et donnent le temps à l'eau de s'infiltrer totalement ou en partie dans le sol. Les fortes pentes (supérieures à 7 %) sont observées en amont de la retenue. Elles favorisent les ruissellements avec des risques de transport de polluants vers les cours d'eau qui alimentent la retenue d'eau.



**Figure 2 : Carte des pentes**

### 3-1-1-2. Densité de drainage du bassin d'alimentation

La carte des densités de drainage (**Figure 3**) présente trois grandes classes de densité : faible, moyenne et forte. Elle présente une dominance de la classe des densités faibles qui se situent en bordure des limites du bassin d'alimentation. Les densités moyennes sont en contact direct avec les cours d'eau primaires et tertiaires. La densité de drainage est cependant forte le long des cours d'eau secondaires et surtout aux intersections des affluents et autour de la retenue.

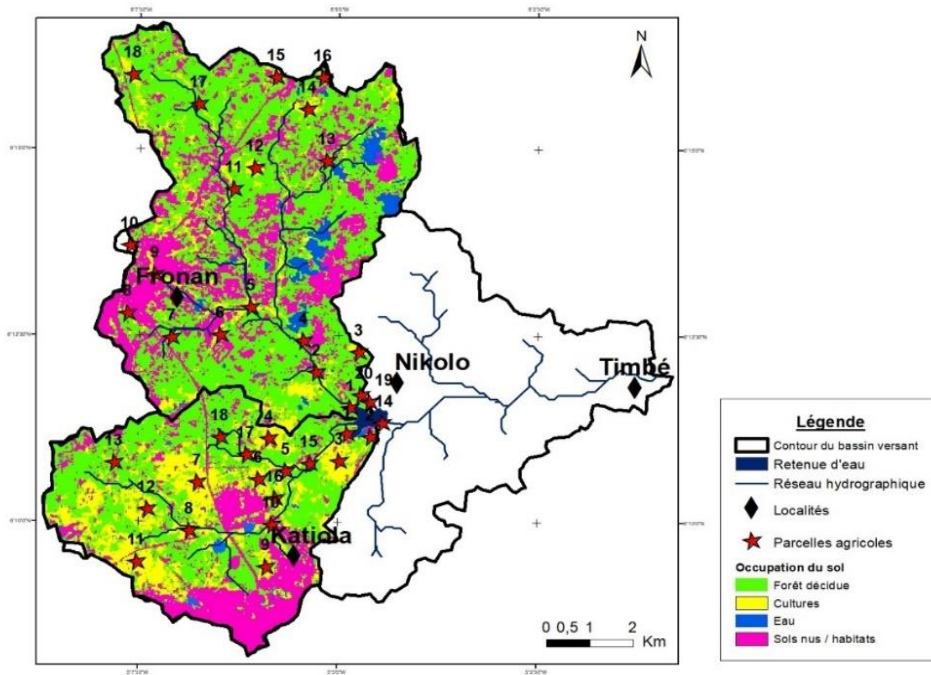


**Figure 3 : Carte des densités de drainage**

### 3-1-1-3. Occupation du sol du bassin d'alimentation

La carte de l'occupation du sol présente quatre classes d'occupation (**Figure 4**).

- Les cultures sont en contact avec les cours d'eau. Ce qui traduit un risque élevé de pollution de la retenue du fait de la forte utilisation des intrants agricoles dans la zone.
- Les zones d'habitation et les sols nus sont situés à proximité des cours d'eau. Ils ont tendance à favoriser le ruissellement des polluants vers la retenue d'eau.
- Les zones hydriques qui regroupent la retenue et ses affluents. Les affluents alimentent la retenue et sont à l'origine du transport des polluants.
- Les forêts (galerie, mosaïque, dégradée) permettent de recueillir et de retenir les polluants ; à augmenter leur dégradation et leur infiltration. Elles n'utilisent pas d'intrants agricoles et ne participent presque pas à la pollution.



**Figure 4 :** Carte de classification du paramètre occupation du sol

**3-1-1-4. Ruissellement**

Le ruissellement du département de Katiola est  $R = 504 \text{ mm/an}$  donc supérieur à  $150 \text{ mm}$ . C'est une valeur importante dans le mécanisme de pollution. Le début des épisodes pluvieux coïncide avec les traitements pesticides. Par le ruissellement, l'eau transporte les polluants agricoles vers la retenue d'eau.

**3-1-2. Indices de vulnérabilité**

La **Figure 5** présente la carte des indices de vulnérabilité de la retenue d'eau. Les indices varient de 1,9 à 3. Les indices les plus élevés se situent majoritairement au Sud et autour des cours d'eau qui alimentent la retenue d'eau. Les zones à partir desquelles les cours d'eau sont susceptibles d'être pollués sont caractérisées par les indices les plus élevés. Elles sont caractérisées par une forte densité de drainage, des pentes fortes et un ruissellement. Ils sont directement en contact avec les cours d'eau. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne des cours d'eau, les valeurs des indices diminuent. Les indices faibles sont caractérisés par de faibles pentes, une faible densité de drainage, un ruissellement négligeable et la présence de forêts.

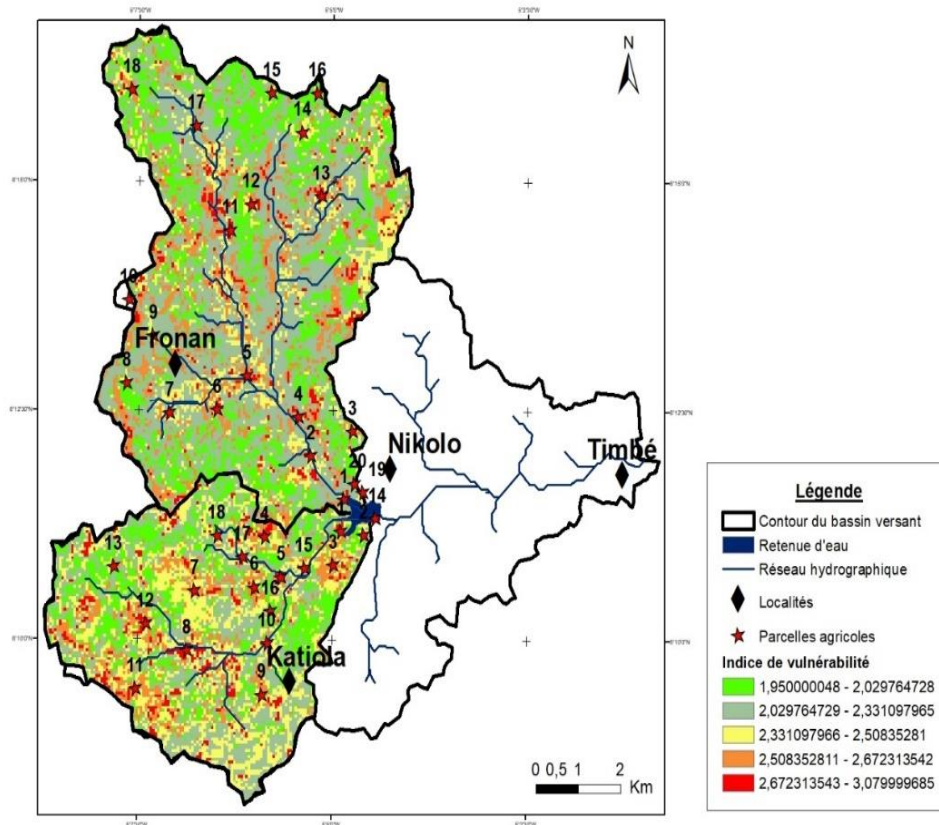


Figure 5 : Carte des indices de vulnérabilité de la retenue d'eau

### 3-2. Cartographie de la pression pesticide exercée sur la retenue d'eau

#### 3-2-1. Paramètres contributifs

##### 3-2-1-1. Paramètres de nuisance

Le **Tableau 7** représente les groupes de paramètres de nuisance des trente-deux molécules actives recensées dans la zone d'étude. La répartition des molécules est la suivante :

- cinq groupes de toxicité dont dix molécules très peu toxiques, huit molécules peu toxiques, neuf molécules toxiques, trois molécules très toxiques et deux molécules extrêmement toxiques ;
- trois groupes de solubilité dont dix molécules peu solubles, treize molécules solubles et neuf molécules très solubles ;
- quatre groupes de rémanence dont trois molécules non persistantes, huit molécules peu persistantes, dix-sept molécules persistantes et 4 molécules très persistantes ;
- quatre groupes de mobilité dont onze molécules non mobiles, quatre molécules peu mobiles, onze molécules mobiles et six molécules très mobiles.

**Tableau 7 : Paramètres de nuisance des matières actives des pesticides**

Paramètres	Classes	Matières actives
Toxicité	Très peu toxique	Atrazine, Chlorothalonil, Chlortoluron, Diuron, Fenebutatin-oxyde, Glyphosate, Linuron, Oxyfluorène, Simazine, Terbutrine
	Peu toxique	Bentazone, Lufenuron, Métolachlore, Pendiméthaline, Propargile, Tebuconazole, Triadimenol, Trichlopyr
	Toxique	Chlorpyriphos-éthyl, Cyanazine, Cypermétrine, Deltamétrine, Dimethoate, Imidaclopride, Lamda-cyhalothrine, Linuron, Métribuzine
	Très toxique	Dinoterbe, Tefluthrine, Triazophos
	Extrêmement toxique	Aldicarbe, Parathion-éthyl
Solubilité	Peu soluble	Chlorothalonil, Cypermétrine, Deltamétrine, Fenebutatin-oxyde, Lamda-cyhalothrine, Lufenuron, Oxyfluorène, Pendiméthaline, Propargile, Tefluthrine
	Soluble	Atrazine, Chlorpyriphos-éthyl, Chlortoluron, Dinoterbe, Diuron, Linuron, Parathion-éthyl, Prométryne, Simazine, Terbutrine,, Tebuconazole, Triadimenol, Triazophos.3
	Très soluble	Aldicarbe, Bentazone, Cyanazine, Dimethoate, Glyphosate, Imidaclopride, Métolachlore, Métribuzine, Trichlopyr
Rémanence	Non persistant	Bentazone, Chlorothalonil, Dimethoate
	Peu persistant	Aldicarbe, Atrazine, Cyanazine, Deltamétrine, Glyphosate, Lufenuron, Métolachlore, Métribuzine
	Persistant	Chlorpyriphos-éthyl, Chlorotoluron, Cypermétrine, Dinoterbe, Lamda-cyhalothrine ; Linuron, Oxyfluorène, Parathion-éthyl, Pendiméthaline, Prométryne, Propargile, Simazine, Tefluthrine, Terbutrine, Tebuconazole, Triazophos, Trichlopyr
	Très persistant	Diuron, Fenebutatin-oxyde, Imidaclopride, Triadimenol
	Non mobile	Cypermétrine, Deltamétrine, Glyphosate, Lamda-cyhalothrine, Lufenuron, Oxyfluorène, Parathion-éthyl, Pendiméthaline, Propargile, Tefluthrine, Tebuconazole
Mobilité	Peu mobile	Chlorothalonil, Chlorpyriphos-éthyl, Chlorotoluron, Terbutrine
	Mobile	Atrazine, Cyanazine, Diuron, Fenebutatin-oxyde, Imidaclopride, Linuron, Métolachlore, Prométryne, Simazine, Triadimenol, Triazophos
	Très mobile	Aldicarbe, Bentazone, Dimethoate, Dinoterbe, Métribuzine, Trichlopyr

**3-2-1-2. Charges de matières actives**

Les charges spécifiques de chaque parcelle ont servi à la détermination des charges de matières actives des différentes zones contributives à la pollution de la retenue d'eau. Les deux sous-bassins d'alimentation ont respectivement des charges de matières actives de 685,5 Kg et 616,7 Kg, soit un total de 1302,2 Kg. Ces charges sont issues de la somme des charges des parcelles agricoles. Les charges contributives de chaque parcelle dépendent de la superficie et de la nature des plantes cultivées. Le glyphosate est la molécule la plus utilisée. Sur trente-huit parcelles agricoles, il est présent dans vingt-deux parcelles. Il a la charge la plus élevée avec 699,894 Kg.

**3-2-2. Indices de pression pesticide**

La **Figure 6** présente la carte des indices de pression pesticide exercée sur la retenue d'eau. Les valeurs des indices varient entre 10000 et 229000. Les indices les plus élevés sont situés au Sud-ouest et au Nord de la retenue d'eau. Les indices les plus faibles, sont localisés à l'Ouest, au Centre et autour de la retenue. Les indices les plus élevés sont autour des cours d'eau saisonniers. Les indices moyens sont situés autour des



cours d'eau permanents et les indices les plus faibles autour des cours d'eau principaux. Les cours d'eau saisonniers qui disparaissent pendant la saison sèche, deviennent en saison pluvieuse les principales sources d'alimentation des cours d'eau principaux. Ces cours d'eau saisonniers, étant dans des zones à indice de pression élevée sont exposés aux polluants agricoles des zones qu'ils drainent.

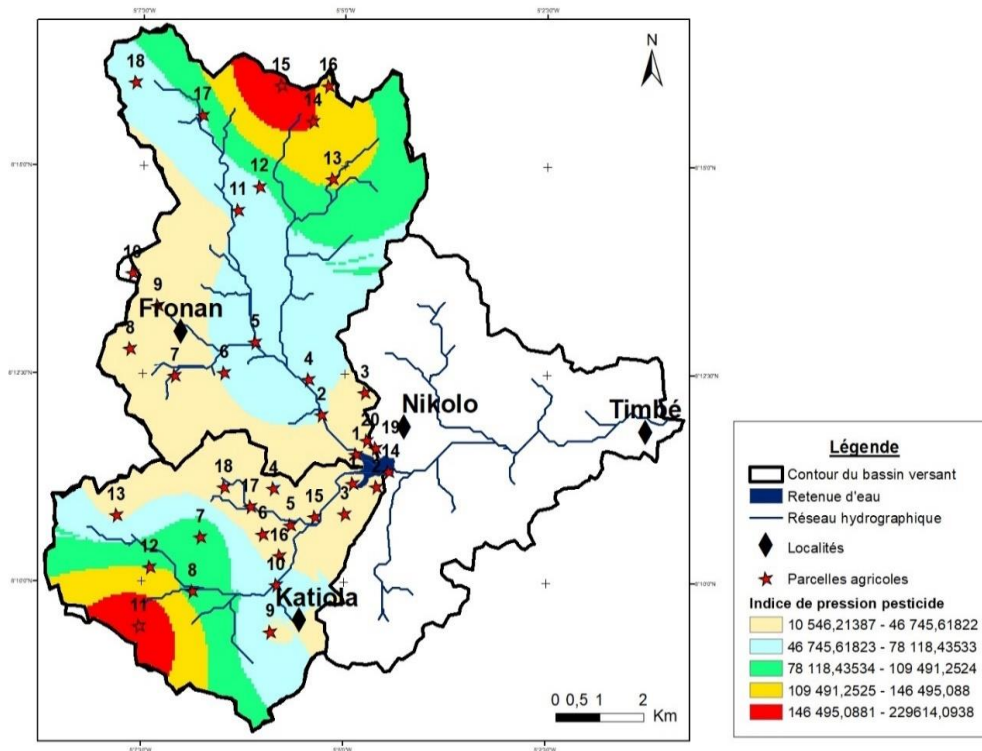


Figure 6 : Carte des indices de pression pesticide sur la retenue d'eau

### 3-3. Cartographie des indices de risques potentiels de pollution pesticide de la retenue

La **Figure 7** présente la carte des indices de risques potentiels de pollution pesticide de la retenue d'eau. Elle représente des indices allant de 22000 à 659000. Les indices les plus élevés se situent au Nord et au Sud-ouest du bassin d'alimentation et autour des cours d'eau tertiaires. Les indices de risques moyens sont situés autour des zones à indices élevés, au Centre et autour des cours d'eau secondaires. Les indices faibles et très faibles sont localisés au Centre et à l'Ouest, autour des cours d'eau principaux. Les indices les moins élevés (inférieurs à 95000) se situent autour de la retenue.

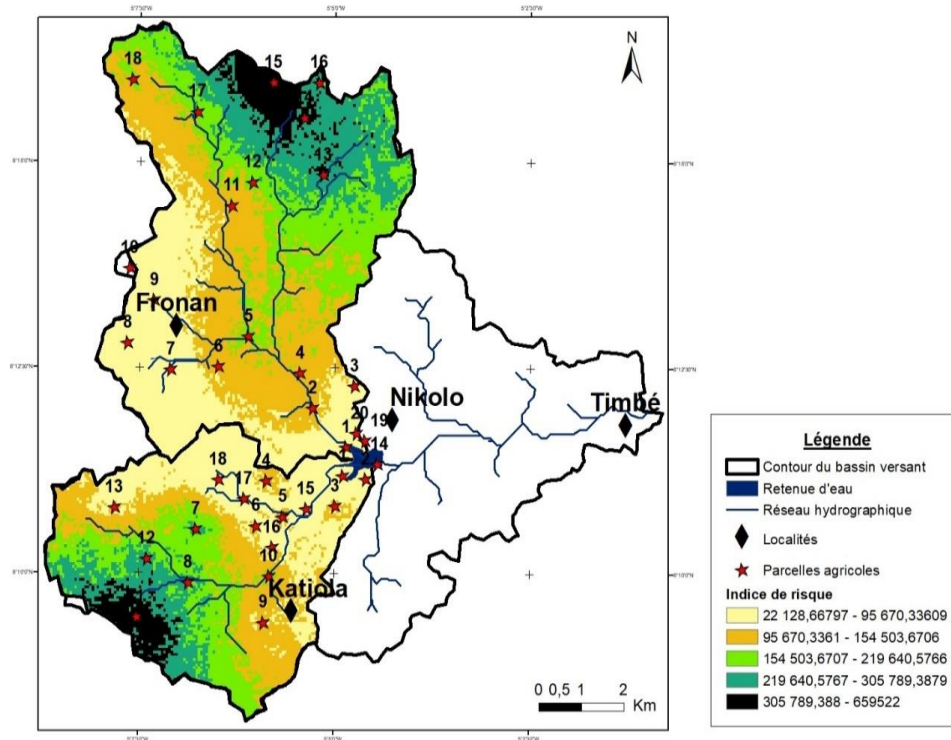
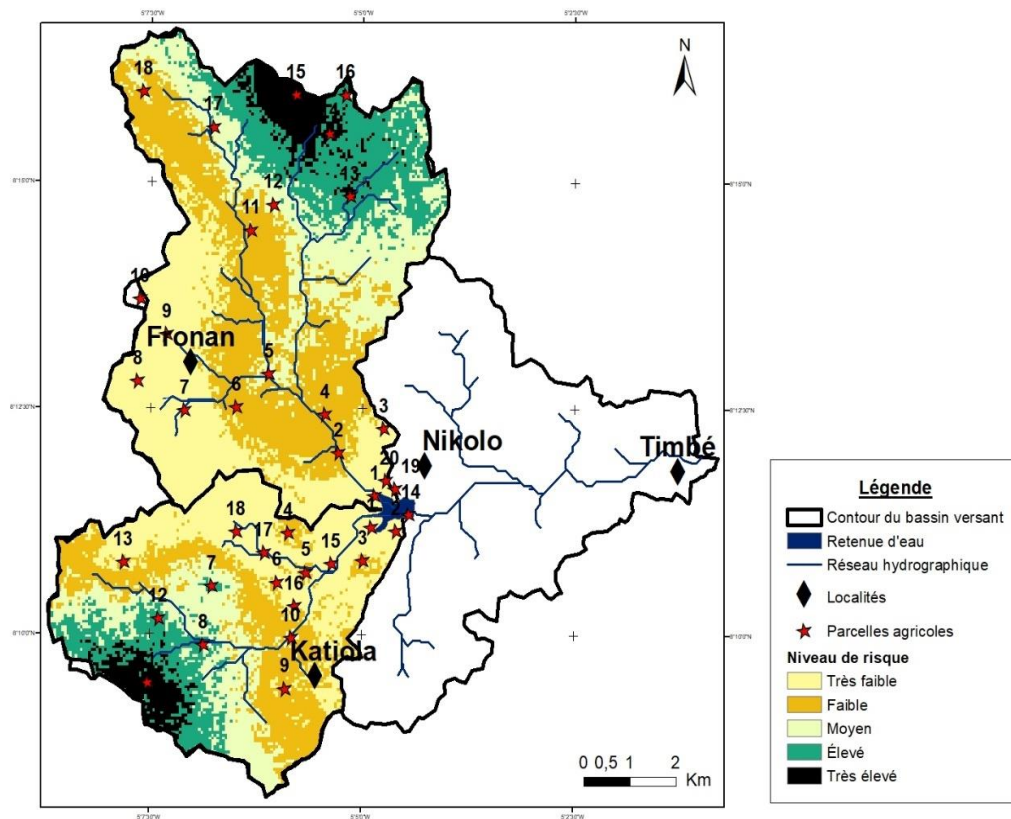


Figure 7 : Carte des indices de risques potentiels de pollution pesticide de la retenue d'eau

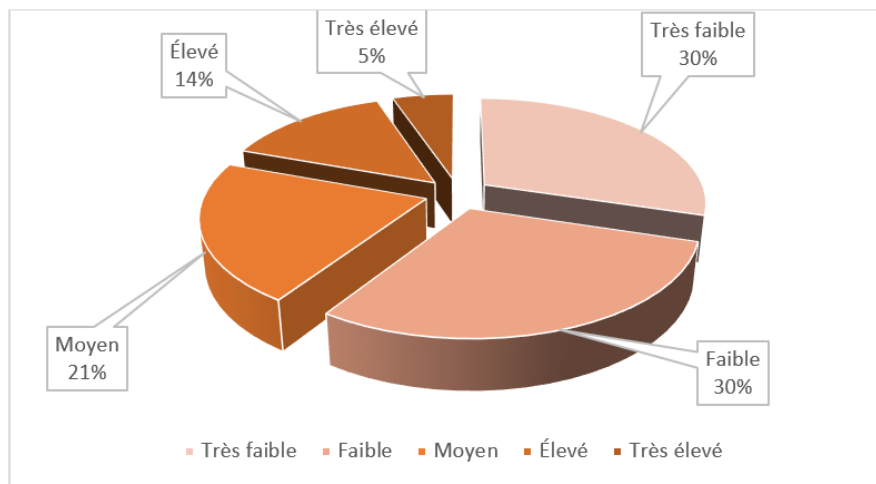
### 3-4. Cartographie des niveaux de risques potentiels de pollution pesticide de la retenue d'eau

La **Figure 8** présente la carte des niveaux de risques potentiels de pollution pesticide de la retenue d'eau. Elle regroupe cinq classes (très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée) de risques potentiels.

- Les niveaux de risques très faibles et faibles occupent 60 % (**Figure 9**) de la surface totale des risques potentiels. Les niveaux de risques très faibles sont situés au Centre du bassin d'alimentation et autour de la retenue d'eau et de ses affluents principaux. Les niveaux de risques faibles sont localisés au Centre-nord et au Centre-sud, autour de certains cours d'eau principaux. La vulnérabilité et la pression pesticide étant faibles, les niveaux de risques très faibles et faibles ont un impact peu important sur la pollution pesticide de la retenue d'eau.
- Les niveaux de risques moyens occupent 21 % de la surface totale des risques potentiels. Les zones de risques moyens se situent au Nord et au Sud-ouest du bassin d'alimentation, autour des zones de niveaux de risques faibles. Ces niveaux de risques se situent également autour des cours d'eau secondaires. La vulnérabilité étant moyenne avec un usage modéré de pesticides, son impact sur la pollution des cours d'eau et sur la retenue est moyen.
- Les niveaux de risques élevés (10 %) et très élevés (5 %) sont situés au Sud-ouest et au Nord du bassin d'alimentation, autour des affluents primaires de la retenue d'eau. Ce sont des niveaux de risques qui contribuent fortement à la pollution pesticide de la retenue. Les zones de forts risques de pollution sont caractérisées par une vulnérabilité intrinsèque élevée et des activités agricoles intenses à usage excessif de pesticides.



**Figure 8 :** Carte des niveaux de risques potentiels de pollution pesticide de la retenue d'eau



**Figure 9 :** Pourcentages surfaciques des niveaux de risques potentiels de la retenue d'eau

### 3-5. Validation de la carte de risques potentiels

Pour la validation de la carte de risques potentiels, deux analyses pesticides ont été effectuées. Les prélèvements des échantillons (A et B) ont été réalisés dans les cours d'eau de deux sous-bassins d'alimentation différents où les niveaux de risques potentiels sont élevés. Les résultats des analyses (**Tableau 8**) montrent que les concentrations des molécules actives retrouvées sont élevées. Les valeurs sont largement supérieures aux lignes directrices de l'OMS. Les niveaux de risques potentiels de pollution élevés coïncident avec le fort taux de pesticides dans les cours d'eau qui s'y trouvent.



**Tableau 8 : Résultats d'analyse des pesticides (en mg.L<sup>-1</sup>) pour la validation de la carte de risques potentiels**

Pesticides Familles	Matières actives	Teneurs		Lignes directrices de l'OMS
		A	B	
Triazine	Désisopropylatrazine	0,0323	0,0936	0,0001
	Déséthylatrazine	0,0237	0,0462	0,002
	Simazine	0,085	0,1011	0,0001
	Cyanazine	0,134	0,1554	0,0001
	Propazine	0,0395	0,0688	0,0001
Triazinone	Métamitron	0,055	0,0871	0,0001
Dérivés de l'urée	Fénuron	0,1183	0,1765	0,0001
	Monuron	0,0303	0,087	0,0001
	Chlortoluron	0,0566	0,0641	0,03
	Isoproturon	0,0421	0,0903	0,009
	Diuron	0,0555	0,101	0,0001
	Buturon	0,0307	0,099	0,0001
	Chloroacétamide	Métazachlore	0,0449	0,0786
Carbamate	Aldicarbe	0,1071	0,204	0,01
Amino phosphate	Glyphosate	0,4701	0,7651	0,0001

## 4. Discussion

### 4-1. Impact de la vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité s'est effectuée à partir des paramètres de ruissellement, de la pente, de la pédologie, de la densité de drainage et de l'occupation du sol. Ces paramètres sont jugés comme les plus significatifs et les plus utilisés [19, 20]. Les indices de vulnérabilité varient de 1,95 à 3,08. Selon la discrétisation par seuils naturels de Jenks, ces indices sont repartis en cinq classes. Dans l'établissement de la carte de vulnérabilité, l'utilisation du paramètre « distance au cours d'eau » aurait pu être pris en compte pour l'évaluation spatiale. Selon [21], la contamination des eaux de surface par les pesticides est très dépendante de la distance séparant le lieu d'application du ruisseau collecteur. Ce paramètre n'a pas été pris en compte car de toutes les cultures recensées sur la zone d'étude, seule la culture de l'anacardier est pérenne. Les autres cultures sont dépendantes des saisons de l'année et des besoins du marché. Les cours d'eau d'ordre 1 et 2 disparaissent pendant la saison sèche et font leur apparition pendant la saison pluvieuse. Nous avons donc préféré l'indicateur « densité de drainage » à celui de « distance au cours d'eau ». Le choix de la densité est plus objectif car il donne plus de détails sur les aspects du réseau hydrographique d'un bassin versant. L'assignation des cotes aux paramètres dans l'utilisation de la méthode AHP de Saaty s'est basée sur des phénomènes observables. L'approche de l'évaluation de la vulnérabilité utilisée privilégie l'enquête de terrain. Les valeurs attribuées aux paramètres, ont permis d'estimer la contribution des différents paramètres à la vulnérabilité de la retenue d'eau. Dans la reclassification de l'occupation du sol, la cote la plus faible a été attribuée à la forêt contrairement à la surface de l'eau. Une eau stagnante n'ayant pas de contact avec la retenue peut avoir un impact sur la pollution de celle-ci. Elle peut alimenter par ses affluents la retenue, considérée comme exutoire. Quant à la forêt, elle peut reconstituer une végétation capable de freiner les polluants. Une eau stagnante et une forêt naturelle ne peuvent donc pas avoir les mêmes effets sur la vulnérabilité. Cette étude a permis de discriminer et de cartographier quatre types d'occupation du sol dont la précision globale du traitement numérique est de 92,05 % et le coefficient Kappa de 0,89. Cette précision du traitement supervisé appliqué aux images explique la bonne qualité de l'occupation du sol obtenu. Ce modèle spatial de données factuelles présente l'intérêt d'une simplification des informations

de terrain ; traduisant ainsi la crédibilité de la carte de vulnérabilité. Pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'inondation de la commune de Bingerville [22] et du suivi de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le bassin versant du Haut Bandama à Tortiya [23], cinq classes de vulnérabilité ont également été retenues. En outre, d'autres études similaires réalisées ont déterminé quatre classes [24]. Les classes d'indices de vulnérabilité peuvent donc varier selon les études réalisées. Tout dépend des limites de classe et des cotes assignées à ces classes au départ par l'opérateur et aussi de la sensibilité de celui-ci [19].

#### 4-2. Impact de la pression pesticide

Les données recueillies sur les matières actives ont permis d'établir la carte thématique de pression pesticide à partir de la charge et de l'indice de nuisance. La charge représente la quantité de pesticides utilisée. Elle est calculée en fonction de la dose de matières actives appliquées, de sa concentration et de la superficie traitée. Les paramètres utilisés pour évaluer l'indice de nuisance des matières actives sont la toxicité, la rémanence, la solubilité et la mobilité. Trente-deux molécules actives ont été répertoriées dans trente-huit parcelles agricoles. Tous les planteurs recensés sur la zone d'étude utilisent des pesticides. La charge de plus d'une tonne (1302,2 Kg) avec plusieurs variétés de matières actives dans un sous-bassin versant de 118 km<sup>2</sup>, atteste d'une utilisation excessive de pesticides. La pression pesticide est faible autour de la retenue et forte autour des affluents primaires et secondaires. Les plus fortes pressions pesticides sont exercées par les cultures du coton et de l'anacarde. La culture cotonnière utilise beaucoup de pesticides, surtout les insecticides durant son cycle de vie. Les plantations d'anacardières étant cultivées sur de grandes superficies utilisent également des quantités importantes de pesticides. La pondération de l'indice de nuisance et de la charge de matière active par parcelle, a permis l'obtention des indices de pression pesticide variant de 10128,214 à 229614,094. À partir de ces indices, cinq classes d'indices ont été retenues selon la discrétisation par seuils naturels de Jenks. Les mêmes résultats (cinq classes) ont été obtenus par des études réalisées de 1998 à 2005 sur la variabilité spatiale de l'indice phytosanitaire du bassin versant de la Marahoué [18]. Au-delà des paramètres de l'indice de nuisance, de l'indice de charge de matière active (dose, surface traitée et concentration), l'apport d'autres variables auraient pu être utiles pour une meilleure interprétation des classes d'influence. Il s'agit :

- des paramètres tels que « méthode d'application » et « nombre d'application pour chaque culture » des pesticides ;
- de la dérive des pesticides ou l'effet de « drift » à partir des applications par pulvérisation ;
- de l'usage fait des restes de pesticides après le traitement.

Ces paramètres n'ont pas été pris en compte pour différentes raisons en rapport avec les pratiques agricoles de la zone d'étude. Le nombre et les méthodes d'application des pesticides pour chaque culture varient d'un planteur à un autre. Certaines cultures telles que les cultures maraichères et celle du coton peuvent recevoir plusieurs doses de pesticides selon leurs besoins durant le cycle agricole. Selon l'application, l'impact de l'effet de « drift » à partir des applications par pulvérisation sur la retenue d'eau est négligeable. Tous les agriculteurs utilisent des pulvérisateurs à dos munis de leviers ou de compresseurs. Cette pratique exige donc l'usage de molécules actives sous la forme de concentré liquide homogène, d'émulsions dans une phase liquide ou de poudre applicable après dispersion dans l'eau. Les proportions de pesticides pouvant s'échapper sous forme de gouttelettes ou de gaz et atteindre la retenue d'eau restent faibles [25]. La contamination des eaux de surface résulte plus du ruissellement et du lessivage que de la dérive des pulvérisations [26]. Aussi les résidus de pesticides après usage n'interviennent pas dans l'estimation de la charge polluante. Les restes de pesticides et des emballages, pouvant engendrer des risques de pollution n'ont pu être quantifiés. Chaque exploitant agricole a une gestion particularisée et improvisée de ces résidus. Pour y remédier, nous avons procédé à l'identification de l'historique de toutes les parcelles au cours d'un cycle agricole. Le nombre d'épandage et la dose par hectare ont permis d'obtenir une vision globale des pratiques pesticides. La moyenne des fréquences est de deux épandages par parcelle durant le cycle agricole. Malgré l'insuffisance

relevée, il n'en demeure pas moins que les cartes thématiques de pression pesticide établies conviennent parfaitement à la discrimination des zones exerçant une pression polluante. Les études réalisées sur la variabilité spatiale de l'indice phytosanitaire du bassin versant de la Marahoué [18], révèlent les mêmes résultats : cinq classes d'indices de pression, allant de « très faible » à « très fort ». Quatre classes de pression pesticide (faible, moyenne, élevée et très élevée) ont été identifiées dans l'étude de l'organisation spatiale des activités agricoles et la pollution des eaux par les pesticides en Martinique [17]. L'obtention de la carte de pression à partir de cinq ou quatre classes prend toujours en compte aussi bien les indices liés aux caractéristiques chimiques, que physiques des molécules actives des pesticides.

#### **4-3. Risques potentiels de pollution lié aux pesticides**

La discrimination des niveaux de risques potentiels de pollution pesticide de la retenue d'eau s'est effectuée à partir de la vulnérabilité du milieu et de la pression exercée par les pesticides. Le choix de la multiplication des couches a permis d'attribuer un potentiel de risque nul à toutes les zones n'ayant subi aucun traitement pesticide. La méthode a permis de déterminer des indices allant de 22128,668 à 659522. Selon la discrétisation par seuils naturels de Jenks, cinq classes indices correspondant à cinq niveaux de risques potentiels (très faible, faible, moyen, élevé et très élevé). Les niveaux de risques obtenus reflètent les performances des unités mesurées à partir des indicateurs à l'échelle du bassin d'alimentation. La cartographie des zones à risques potentiels montre que 60 % de la surface du bassin d'alimentation de la retenue d'eau correspond à un risque faible, 21 % à un risque moyen et 19 % à un risque élevé et très élevé. Ces zones à forts risques de pollution pesticide correspondent aux zones de vulnérabilité et pression pesticide élevées. Les zones à faibles risques de pollution autour de la retenue d'eau ont une vulnérabilité et une pression pesticide faibles dues à la forêt galerie. Les niveaux de risques très faibles se situent autour de la retenue d'eau, mais paradoxalement celle-ci contient une quantité importante de pesticide. Cela est dû au fait que depuis les zones à risques élevés, les molécules actives sont transportées par les affluents jusqu'à l'exutoire qui est la retenue d'eau. La détermination des niveaux de risques avec plus de précisions doit tenir compte aussi bien de la vulnérabilité intrinsèque du milieu que de la pression polluante ainsi que des propriétés des polluants. Elle permet la détermination de zones prioritaires d'action de protection pour préserver la qualité des eaux de surface. Les données utilisées dans le cadre de cette étude offrent une haute résolution spatiale dans l'identification des zones à risques. Cette démarche constitue une alternative intéressante aux études classiques de diagnostic des pollutions agricoles diffuses à l'échelle des bassins élémentaires. Les résultats obtenus sont semblables à ceux basés sur la méthode de l'analyse spatiale [17, 18] et la méthode phytopixel [27]. Ces méthodes basées sur la modélisation spatiale d'indicateurs relatifs à la vulnérabilité environnementale des eaux de surface et à la pression des activités agricoles ont permis de déterminer cinq classes de risques potentiels de contamination pesticide. Leur application s'est effectuée dans des bassins versants de petites tailles puis agrégée à d'autres de plus grandes tailles. C'est le cas du bassin versant de Save (1150 km<sup>2</sup>) en France destiné à l'alimentation en eau potable de la population. Ces résultats ont été utilisés par l'agence régionale de l'eau de ladite localité pour déterminer les zones de protection d'une station de pompage d'eau. D'autres chercheurs ont utilisé des méthodes avec des paramètres différents pour établir les niveaux de risques potentiels de pollution pesticide. Ces méthodes, tout en évaluant à la fois les variables d'exposition et de toxicité aboutissent à la distinction des classes de risques [28]. La confirmation des résultats de notre étude a été effectuée par des mesures de la qualité des cours d'eau situés dans les zones à risques élevés. Les résultats d'analyse ont permis la validation de la carte de risques potentiels. Ces résultats sont en conformité avec la carte des zones à risques. Les cours d'eau situés dans les zones à risques élevés ont les concentrations pesticides les plus élevées. Le risque de pollution de la retenue d'eau est à l'image de la pollution observée dans certains bassins agricoles de la Côte d'Ivoire. Les analyses réalisées sur des échantillons d'eau des lagunes Aghien-Potou ont mis en évidence la présence d'importantes quantités de pesticides [29]. La carte de risques potentiels obtenue reflète la réalité et permet d'établir un diagnostic général. Ce diagnostic peut servir à mieux orienter la protection de la retenue d'eau destinée à l'alimentation en eau potable dans le département de Katiola.

## 5. Conclusion

Cette étude a permis de cartographier les différents niveaux de risques de pollution agricole par les pesticides de la retenue d'eau de Katiola. La différenciation des zones contributives à la pollution résulte de l'indicateur composite de risque spatiale issu de la combinaison des indices de vulnérabilité et de la pression pesticide. Les niveaux de risques révèlent que 5 % de la superficie du bassin d'alimentation de la retenue se trouve dans une zone à risques très élevés, 14 % dans une zone à risques élevés, 21 % dans une zone à risques moyens, 30 % dans une zone à risques faibles et 30 % dans une zone à risques très faibles. Les zones à risques sont en rapport de conformité avec les zones de vulnérabilité et de pression pesticide. Elles se situent autour des affluents primaires et secondaires. Le risque de pollution est avéré. La carte des risques établie, peut être utilisée pour la mise en place de mesures d'atténuation et de zones d'action prioritaires pour la protection de la retenue d'eau.

## Références

- [1] - NATIONS UNIES, "Objectifs du Millénaire pour le développement ", Rapport, (2015) 75 p., [https://www.un.org/fr/millenniumgoals/reports/2015/pdf/rapport\\_2015.pdf](https://www.un.org/fr/millenniumgoals/reports/2015/pdf/rapport_2015.pdf) (11 juin 2022)
- [2] - A. BUZELAY, "de la fragilité de l'état à celle de l'union sous l'angle de la politique économique", *Civitas Europa*, 28 (2012) 111 - 120 h, <https://www.cairn.info/revue-civitas-europa-2012-1-page-111.htm> (24 septembre 2022)
- [3] - J. KONÉ et K. S. SILWÉ, "En Côte d'Ivoire, la fourniture des services d'eau et d'assainissement demeure insuffisante", *Dépêche d'Afrobareometer*, 416 (29 décembre 2020)
- [4] - S. PONGUANE, "Prévention des pertes de produits alimentaires tout au long de la chaîne de valeur en Afrique", *Meilleures pratiques*, 4 (2021) 1 - 6
- [5] - A. M. TOÉ, M. OUÉDRAOGO, R. OUÉDRAOGO, S. ILBOUDO, P. I. GUISSOU, "Pilot study on agricultural pesticide poisoning in Burkina Faso", *Interdisciplinary Toxicology*, 6 (4) (2013)
- [6] - T. M. MULIELE, C. M. MANZENZA, L. W. EKUKE, C. P. DIAKA, D. M. NDIKUBWAYO, O. M. KAPALAY et A. N. MUNDELE, "Utilisation et gestion des pesticides des cultures maraîchères : cas de la zone de Nkolo dans la province du Kongo Central, République Démocratique du Congo", *Revue de Biosciences appliquées*, 119 (2017) 11954 - 11972
- [7] - Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MINADER), "Programme de transformation de l'agriculture en Afrique de l'Ouest (PTAAO) : Plan de gestion des pestes (PGP)", *Rapport final*, (2020) 93 p.
- [8] - S. K. TRAORÉ, K. MAMADOU, A. DEMBÉLÉ, P. LAFRANCE, P. MAZELLIER, P. HOUÉNOU, "Contamination de l'eau souterraine par les pesticides en régions agricoles en Côte d'Ivoire (centre, sud et sud-ouest)", *Journal Africain des Sciences de l'Environnement*, 01 (2006) 1 - 9
- [9] - J. RETY, "Évaluation des risques liés aux résidus de pesticides dans l'eau de distribution", ANSES : rapport d'étude scientifique, (2013) 210 p.
- [10] - T. TREMBLAY, C. M. KAMULA, S. CIASZTEK and Z. A. KUZYK, "Overview of the geochemical properties of the marine sediments of Koojessé Inlet, Frobisher Bay, Nunavut", *Canada-Nunavut Geoscience Office*, (2020) 125 - 144
- [11] - S. DOUMBIA, A. POUCLLET, A. KOUAMELLAN, J. J. PEUCAT, M. VIDAL, C. DELOR, "Pétrogénèse des granitoïdes birimiens du Paléoproterozoïque de type juvénile en Côte-d'Ivoire centrale, Afrique de l'Ouest ; géochimie et géochronologie", *Recherche précambrienne*, 87 (1 - 2) (1998) 33 - 63
- [12] - G. GIRARD, J. M. AVENARD, M. EL DIN, J. SIRCOULON, P. TOUCHEBEUF, J. L. GUILLAUMET, E. ADJANOHOON, A. PERRAUD, "Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire", Paris (France), Mémoire ORSTOM, 50 (1971) 113 - 151
- [13] - FOOTPRINT, "Pesticide Properties Database", Database collated by the University of Hertfordshire as part of the EU-funded FOOTPRINT", Project (FP6-SSP-022704), <http://www.eu-footprint.org/ppdb.html>

- [14] - PPDB, "Base de données sur les propriétés des pesticides", <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/>
- [15] - T. L. SAATY, "The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority setting, Resource allocation", McGraw-Hill (New York), USA, (1980) 19 p.
- [16] - B. ROY, "Méthodologie multicritère d'aide à la décision", Economica, Paris, (1985) 79 p.
- [17] - M. HOUDART, "Organisation spatiale des activités agricoles et pollution des eaux par les pesticides. Modélisation appliquée au bassin-versant de la Capot, Martinique", Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, (Martinique), France, (2005) 485 p.
- [18] - A. S. AKPO, "Application de la géomatique à l'identification des zones vulnérables à la pollution diffuse : cas du bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire)", Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2013) 195 p.
- [19] - A. E. EBA, K. J. KOUAME, S. K. DEH, K. A. ANOH, R. BALLIET, M. TOURE et J. P. JOURDA, "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 Aghein à Abidjan, (Sud de la Côte d'Ivoire)", *European Scientific Journal*, Vol. 12, (2016) 1857 - 7431
- [20] - S. K. DEH, K. J. KOUAME, M. B. SALEY, K. J. J TANO, A. ANANI, K. H. SIGNO, J. P. JOURDA et J. BIÉMI, "Évaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates (NO<sub>3</sub>) des eaux souterraines du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire)", *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 06 (3) (2017) 1390 - 1408
- [21] - F. COLIN, "Approche spatiale de la pollution chronique des eaux de surfaces par les produits phytosanitaires : cas de l'atrazine dans le bassin versant du Sousson (Gers, France)", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, (2000) 255 p.
- [22] - E. L. EBA, G. E. AKE et J. P. JOURDA, "Evaluation de la Vulnérabilité à l'Inondation des Communes à Proximité des Grandes Villes Ouest Africaines : Cas de la Commune de Bingerville (Est d'Abidjan - Côte d'Ivoire)", *European Scientific Journal*, 17 (14) (2021) 277 - 299
- [23] - D. T. SORO, L. O. BLE et J. J. T. KOUA, "Suivi de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) et son impact sur les écoulements", *EWASH & TI Journal*, 6 (1) (2022) 754 - 760
- [24] - K. A. ANOH, S. G. EBLIN, & T. J. KOUA, "Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux de surface du bassin versant du lac de Taabo en Côte d'Ivoire aux flux diffus de Phosphore", *Revue Ivoire Sci. Technol*, 32 (2018) 131 - 152
- [25] - J. T. SANDERSON, B. BOERMA, G. LANSBERGEN, M. BERG, "Induction and Inhibition of Aromatase (CYP19) Activity by Various Classes of Pesticides", *Toxicology and Applied Pharmacology*, 182 (2002) 44 - 54
- [26] - S. REICHENBERGER, M. B. A. SKITSCHAK, H. G. FREDE, "Stratégies d'atténuation pour réduire les apports de pesticides dans les eaux souterraines et de surface et leur efficacité ; une critique", *Sci Total Environ.*, 384 (1 - 3) (2007) 1 - 35
- [27] - F. MACARY, M. BALESTRA, C. PUECH, F. SAUDUBRA, "Méthode d'estimation d'un risque spatialisé de la contamination des eaux de surface par les intrants agricoles à différentes échelles spatiales", Conférence internationale, Clermont-Ferrand, France, (2007) 19 p.
- [28] - A. G. HORNSBY, "Site-specific pesticide recommendations : the final step in environmental impact prevention", *Weed technology*, 06 (2017) 736 - 742
- [29] - A. TRAOÉ, "Impacts des changements climatiques et du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol sur les ressources en eau de l'environnement lagunaire d'Aghien et de Potou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)", Thèse de Doctorat Unique, Université Félix Houphouët-Boigny, (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2016) 241 p.