



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADÉMIQUE :  
2020-2021

N° D'ORDRE : 0425 / 2021

N° CARTE D'ÉTUDIANT :  
CI0411009858

## MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**Impact des activités d'orpaillage du  
périmètre minier de Tiebaya sur le bilan  
hydrique de la retenue de Issia (Centre-  
ouest de la Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE :

SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

**BOKO JAIRUS CHRISTOS KOUAKOU**

JURY

Président : M. DIBI BROU, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Encadreur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Soutenu publiquement  
le : 07 Octobre 2021



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADÉMIQUE :  
2020-2021

N° D'ORDRE : 0425 / 2021

N° CARTE D'ÉTUDIANT :  
CI0411009858

LABORATOIRE :

SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT

# MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**Impact des activités d'orpaillage dans le  
périmètre minier de Tiebaya sur le bilan  
hydrique de la retenue d'Issia (Centre-ouest  
de la Côte d'Ivoire)**

Présenté par :

**BOKO JAIRUS CHRISTOS KOUAKOU**

JURY

Président : M. DIBI BROU, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Encadreur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Soutenu publiquement  
le : 07 Octobre 2021

## **DEDICACE**

A mon Père KOBENAN BOKO

A ma Mère OUATTARA FATOU

A mon Frère BOKO DYDIME ISMAEL QUOFFIH

A mes Sœurs BOKO DEFLORA, BOKO AUDREY et BOKO EUNICE

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous voudrions remercier tous ceux qui, à travers un appui scientifique, financier ou un soutien moral nous ont aidé à réaliser ce mémoire.

Nous tenons à remercier :

- le Professeur **TIDOU Abiba Sanogo** épouse **KONE**, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé pour avoir accepté notre inscription en Master de Génie de l'Eau et de l'Environnement et pour la formation de qualité dont nous avons bénéficiée ;
- le Professeur **KOUASSI Kouakou Lazare**, Directeur de l'UFR Environnement, de nous avoir fait confiance. Nous vous réitérons nos sincères remerciements pour nous avoir inculqué l'amour du travail ;
- le Docteur **DIBI Brou**, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), par ailleurs Président du Jury, pour avoir accepté de nous accueillir dans son laboratoire.
- Le Docteur **KONAN-WAIDHET Arthur Brice**, Directeur Scientifique de ce travail, pour sa confiance. Je vous réitère ma reconnaissance pour m'avoir inculqué l'amour du travail bien fait.
- le Docteur **MANGOUA Oi Mangoua Jules**, Responsable du parcours Master Génie de l'Eau et de l'Environnement, pour tous ses efforts à l'égard de notre promotion ;
- Nos sincères gratitude vont à l'endroit du Docteur **ANOH Kouao Armand**, Maître-Assistant, encadreur de ce travail. Vos conseils ont suscité en moi des sentiments de persévérance dans l'effort. Cher maître, votre rigueur, vos conseils, vos directives et votre mine toujours joviale en toute circonstance m'ont donné espoir dans les moments de peine. Je tiens encore à vous remercier Monsieur pour le temps accordé à ce travail dans le but de son amélioration et pour vos précieux conseils.
- Notre gratitude va également à l'endroit de la **Société Minière Tiebaya Gold** pour avoir permis cette étude sur leur site ;
- Notre reconnaissance à l'endroit du Docteur **EBLIN Sampah Georges** pour avoir non seulement instruit et examiné ce mémoire.

À tous le corps Enseignants-Chercheurs des UFR Agroforesterie et Environnement, merci pour les conseils, les connaissances scientifiques et pédagogiques transmis au cours de mon parcours universitaire

Nos remerciements vont également à l'endroit de l'équipe de Doctorants du LSTE, plus particulièrement à **KOFFI Bérenger, KOUADIO Kouamé Jean Olivier, TOURE Fabrice, OUEDE Blaise, COULIBALY Brice, AFFESSI Serge, KADJO Florence, KRE YON**

**Edwige et ADJORO Serge** et mes camarades de promotion 2020-2021 de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement pour leurs soutiens, critiques et conseils prodigués tout au long de la réalisation de ce travail.

## TABLE DES MATIERES

<b>DEDICACE</b> .....	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>ii</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>ix</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>PREMIERE PARTIE : GENERALITES</b> .....	<b>3</b>
1.1    Présentation de la zone d'étude.....	3
1.1.1    Localisation de la zone d'étude .....	3
1.1.2    Climat.....	3
1.1.3    Réseau hydrographique.....	4
1.1.4    Relief et Caractéristiques morphométriques du bassin versant de la Lobo .....	4
1.1.5    Sols.....	6
1.1.6    Contexte géologique et hydrogéologique .....	6
1.1.6.1    Aperçu géologique .....	6
1.1.6.2    Aperçu hydrogéologique .....	7
1.1.7    Aspects socio-économiques du bassin .....	8
1.1.7.1    Population .....	8
1.1.7.2    Activités économiques .....	8
1.1.8    Alimentation en eau potable de Issia .....	9
1.2    Impact des activités d'orpillage sur la disponibilité en eau de surface.....	9
1.3    Notion d'imagerie et de télédétection.....	10
1.4    Modélisation.....	10
<b>DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES</b> .....	<b>12</b>
2.1    Données.....	12
2.1.1    Données climatiques .....	12
2.1.2    Données hydrométriques .....	12
2.1.3    Données morphologiques .....	12
2.1.4    Données raster .....	12
2.2    Matériel de traitement.....	13
2.3    Méthodes .....	13
2.3.1    Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol .....	13

2.3.1.1	Prétraitement d'image satellitaire .....	13
2.3.1.2	Traitement des images satellitaires .....	14
2.3.1.3	Composition colorée et interprétation visuelle d'image .....	14
2.3.1.4	Classification supervisée .....	15
2.3.1.5	Vectorisation et représentation cartographique .....	16
2.3.1.6	Taux moyen annuel d'expansion spatiale .....	16
2.3.1.7	Simulation du changement d'occupation de sol futur .....	16
2.3.2	Quantification des flux d'eau de la retenue de Issia .....	17
<b>TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>		<b>21</b>
3.1	Résultats .....	21
3.1.1	Dynamique de l'occupation du sol.....	21
3.1.1.1	Validation des classifications et résultats cartographiques .....	21
3.1.1.2	Dynamique de l'occupation du sol de la zone d'étude.....	21
3.1.1.3	Taux de changement des différents types d'occupation du sol .....	23
3.1.1.4	Prédiction de l'occupation du sol en 2050 .....	24
3.1.2	Restitution des débits de la retenue de Issia à l'aide du modèle SWAT .....	25
3.1.2.1	Calibration du modèle SWAT .....	25
3.1.2.2	Validation du modèle SWAT .....	25
3.1.2.3	Quantification du flux d'eau entrant dans la retenue .....	26
3.1.2.4	Evaporation moyenne de la quantité d'eau au-dessus de la retenue .....	27
3.1.2.5	Simulation des flux d'eau futur entrant dans la retenue d'Issia.....	27
3.1.2.6	Evaporation future moyenne de la quantité d'eau au-dessus de la retenue .....	28
3.2	Discussion .....	28
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>30</b>
<b>REFERENCES .....</b>		<b>32</b>
<b>ANNEXES .....</b>		
<b>RESUME .....</b>		

## LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

<b>IQE</b>	: Indice de Qualité de l'Eau
<b>CCT</b>	: Centre de Cartographie et de Télédétection
<b>DGIHH</b>	: Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine
<b>DHH</b>	: Direction de l'Hydraulique Humaine
<b>DMA</b>	: Drainage Minier Acide
<b>DNRQ</b>	: Direction des Normes, Réglementation et de la qualité
<b>ETM+</b>	: Enhanced Thematic Mapper
<b>FAO</b>	: Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>GLUE</b>	: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
<b>GPS</b>	: Global Position System
<b>LCM</b>	: Land Change Modeler
<b>LULC</b>	: Land Use Land Cover
<b>MCMC</b>	: Markov Chain Monte Carlo
<b>MNA</b>	: Modèle Numérique d'Altitude
<b>OMS</b>	: Organisation Mondiale de la Santé
<b>ParaSol</b>	: Parameter Solution
<b>PSO</b>	: Particle Swarm Optimization
<b>SCS</b>	: Soil Conservation Service
<b>SIG</b>	: Système d'Information Géographique
<b>SODECI</b>	: Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire
<b>SODEXAM</b>	: Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique
<b>SUFI2</b>	: Sequential Uncertainty Fitting
<b>SWAT</b>	: Soil and Water Assessment Tool
<b>SWAT-CUP</b>	: Soil and Water Assessment Tool- Calibration Uncertainties Program
<b>URH</b>	: Unité de Réponse Hydrologique

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I</b> : Caractéristiques physiques et morphométriques du bassin de la Lobo .....	5
<b>Tableau II</b> : Superficies des occupations du sol en Hectare et leurs proportions en pourcentage.....	23
<b>Tableau III</b> : Paramètres d'évaluations de la performance de la calibration (2002-2006) .....	25
<b>Tableau IV</b> : Paramètres d'évaluations de la performance de la calibration (2007-2011).....	25

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Situation de la zone d'étude .....	3
<b>Figure 2</b> : Réseau hydrographique .....	4
<b>Figure 3</b> : Relief du bassin versant de la Lobo .....	5
<b>Figure 4</b> : Caractéristiques pédologiques du bassin versant de la Lobo .....	6
<b>Figure 5</b> : Formations géologiques du bassin versant de la Lobo .....	7
<b>Figure 6</b> : Captage de l'eau brute et unité de potabilisation SODECI-Issia (Kandé, 2020).....	9
<b>Figure 7</b> : Evolution de l'occupation du sol de 2008 à 2019.....	22
<b>Figure 8</b> : Evolution spatiale globale des classes d'occupation de 2008 à 2019.....	23
<b>Figure 9</b> : Occupation de sol en 2050 .....	24
<b>Figure 10</b> : Calibration du model SWAT .....	25
<b>Figure 11</b> : Validation du model SWAT.....	26
<b>Figure 12</b> : Evolution des débits annuels dans la retenue de Issia .....	26
<b>Figure 13</b> : Volume interannuel d'eau évaporée au-dessus de la retenue.....	27
<b>Figure 14</b> : Lame d'eau futur entrant dans la retenue de Issia .....	27
<b>Figure 15</b> : Quantité d'eau évaporée de la retenue de Issia .....	28

## **LISTE DES ANNEXES**

**Annexe 1** : Dégradation visuelle de la qualité de l'eau

**Annexe 2** : Usage du bois pour le soutènement des galeries minières

**Annexe 3** : Risques de surdité par le bruit permanent du marteau

**Annexe 4** : Caractéristiques des scènes utilisées

**Annexe 5** : Paramètres sensibles

**Annexe 6** : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2008

**Annexe 7** : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2013

**Annexe 8** : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2019

**Annexe 9** : Taux de changement

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

L'agriculture a été depuis l'indépendance de la Côte d'Ivoire en 1960, le pilier de son économie et la principale source d'emploi. Malheureusement, la conjugaison des aléas du marché international et du changement climatique avec son corolaire d'exode rural et de modification du calendrier culturale (Soro, 2011), depuis les années 1980, ont astreints l'Etat ivoirien à s'engager dans une politique de diversification de ses bases économiques. L'une des options envisagées a été la mise en valeur des ressources minières (Kouakou, 2018). Depuis lors, le secteur minier contribue à hauteur de 2,3% du PIB (dont 0,7% pour l'or) en 2012 et emploie environ 30 000 personnes. Au regard de la source de revenue qu'elle procure, l'activité minière en général et l'extraction de l'or en particulier a fait de la zone aurifère de Tiebaya, un lieu d'affluence de travailleurs clandestins venus de toutes les contrées de la Côte d'Ivoire et de la sous-région Ouest-Africaine.

En Côte d'Ivoire, l'orpaillage est en perpétuelle évolution sur toute l'étendue du territoire national. C'est une activité de type informel, exploitant les ressources minières de manière non planifiée, en utilisant principalement des méthodes manuelles et des outils rudimentaires (Jacques *et al.*, 2001). C'est une activité légale dont les dispositions sont prévues par le Chapitre 2 du titre IV du code minier ivoirien. Sa clandestinité relève de sa non-conformité aux procédures légales d'autorisations prévues par l'article 05 du code minier et de sa pratique en dehors des règles du métier en utilisant les produits prohibés par la loi minière. Elle représente une sérieuse menace pour la population locale et pour l'environnement car elle se fait de manière artisanale et les produits chimiques utilisés sont nuisibles à la vie humaine et à la nature (Kouakou, 2018). En effet, pour extraire le minerai, les orpailleurs clandestins créent plusieurs fosses qui consistent à vidanger les eaux des nappes des altérites (Koffi *et al.*, 2014). Par ailleurs, ils utilisent plusieurs substances persistantes dans l'environnement pour l'amalgame de l'or. Ainsi, outre l'aspect physique, l'orpaillage artisanal détériore la qualité chimique des ressources en eau de surface. En effet, plusieurs chercheurs dont Yapi *et al.*, (2014), Keumean *et al.*, (2013) et Touré *et al.*, (2010) ont mis en évidence la présence d'éléments trace métallique dans les hydrosystèmes et dans les sols des périmètres miniers. La perturbation du réseau hydrographique se décline aussi en la perte de la biodiversité du milieu aquatique (Koffi *et al.*, 2014). Aussi, l'orpaillage requiert quotidiennement des quantités d'eau allant de 0,6 à 35 m<sup>3</sup> selon l'importance du site de traitement. Cela occasionne le rejet d'eaux usées et de déchets solides à caractère polluant pour les eaux de surface et souterraines. Environ 357 000 m<sup>3</sup> d'eau sont pollués par an (Lankouandé & Maradan, 2013).

Dans le périmètre minier de Tiebaya, cette activité se développe à grande échelle de manière incontrôlée et en dehors de tout cadre légal ou réglementaire. La zone aurifère de Tiebaya,

## INTRODUCTION

située dans le bassin versant de la Lobo est caractérisée par un fort réseau hydrographique avec deux grandes retenues dont l'usage primaire est la boisson. Malheureusement, en aval du périmètre minier de Tiebaya se trouve une retenue d'eau utilisée pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Issia. La ressource en eau est directement impactée par l'activité minière car leur exploitation et en particulier le traitement du minerai requiert des quantités d'eau importantes et s'accompagne d'une pollution tout aussi considérable. Ainsi, les impacts majeurs constatés sur les ressources en aval des sites d'orpaillage sont donc de trois types :

- la raréfaction des ressources en eau, conséquence du captage des ressources pour les besoins en eau de la mine ;
- la dégradation de la qualité des ressources (souterraines et de surface), dues au rejet de boues toxiques, mal voire pas traitées. Ces pollutions peuvent également affecter les écosystèmes ;
- les perturbations hydrogéologiques dûes au pompage constant des nappes phréatiques, effectué pour assécher les fonds des puits de mine.

Face aux conséquences désastreuses de l'orpaillage et à la situation de la retenue de Issia, il convient de faire un diagnostic des flux d'eaux entrant dans la retenue d'eau de Issia. C'est dans cette optique que cette étude dont le thème « **Impacts des activités d'orpaillage du périmètre minier de Tiébaya sur le bilan hydrique de la retenue d'Issia (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire)** » a été initiée. Elle répond à un objectif principal d'évaluer l'incidence de l'orpaillage dans la zone aurifère de Tiebaya sur les flux d'eau entrant dans la retenue de Issia. Les objectifs spécifiques se déclinent en :

- l'évaluation de la dynamique de l'occupation de sol ;
- la quantification des flux d'eau actuel et futur de la retenue de Issia.

Outre l'introduction et la conclusion, ce mémoire s'articule autour de trois parties. La première partie présente les généralités sur le cadre d'étude en présentant toutefois quelques concepts abordés dans l'étude. La deuxième partie décrit le matériel et les méthodes utilisés pour atteindre les objectifs de cette étude. La troisième partie présente les principaux résultats obtenus ainsi que la discussion qui en découle. Une conclusion suivie de perspectives et de références mettent fin à ce mémoire.

# **PREMIERE PARTIE : GENERALITES**

# GENERALITES

## 1.1 Présentation de la zone d'étude

### 1.1.1 Localisation de la zone d'étude

Le bassin versant de la Lobo est situé au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire, entre 6°05' et 6°55' de longitudes Ouest et entre 6°02' et 7°55' de latitudes Nord (Figure 1). Il a une superficie de 12 722 km<sup>2</sup> et un périmètre de 650 km. La majeure partie du bassin est drainée à 2,08 % par le département de Bouaflé ; 1,38% par le département de Buyo ; 24,80 % par le département de Daloa ; 0,97 par le département de Gagnoa ; 19,75 % par le département d'Issia ; 2,27 % par le département de Séguéla ; 5,95 % par le département de Soubré ; 34,06 % par le département de Vavoua ; 5,44 % par le département de Zoukougbeu et 3,28 % par le département de Zuénoula. La ville de Daloa représente le pôle économique de la région (Yao, 2015).

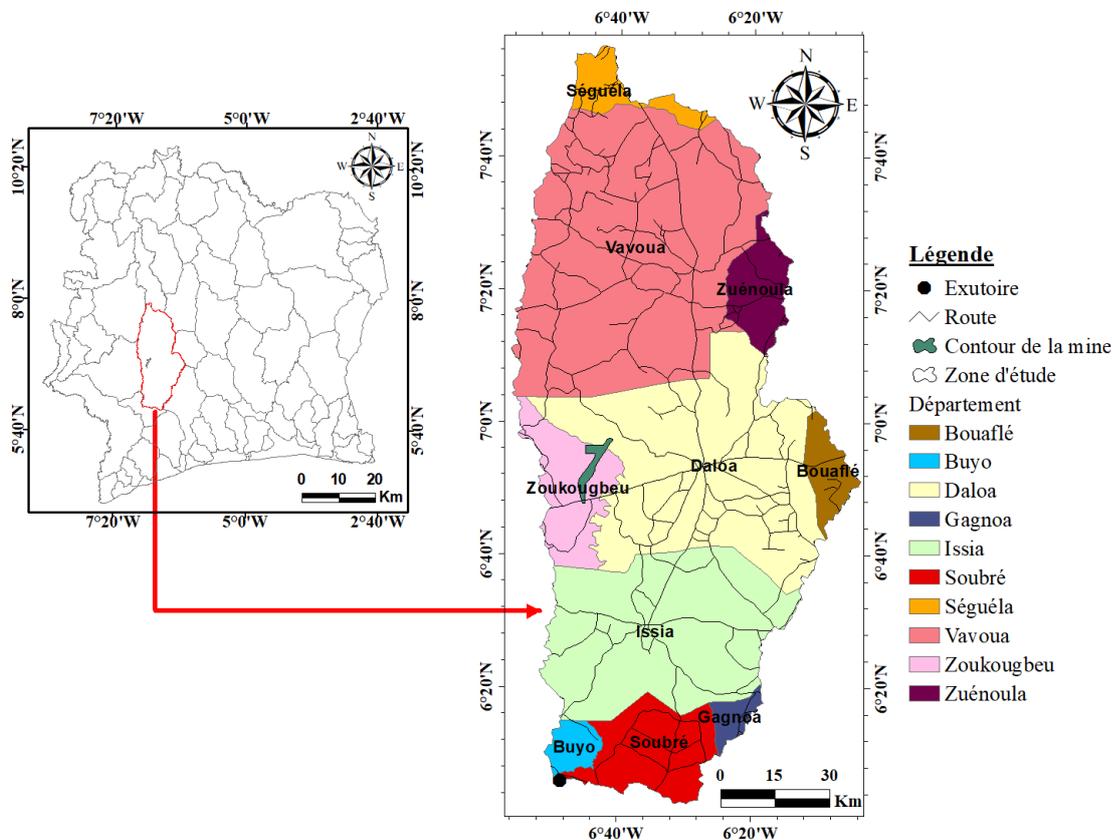


Figure 1 : Situation de la zone d'étude

### 1.1.2 Climat

Deux types de climat balayent le bassin de la Lobo (Yao, 2015). Il s'agit du climat équatorial de transition atténué ou climat baouléen (caractérisé par deux saisons) et du climat équatorial de transition ou climat attiéen (caractérisé par quatre saisons). Le climat équatorial de transition atténué s'observe dans la moitié Nord du bassin tandis que le climat équatorial de transition s'observe dans la partie Sud du bassin.

### 1.1.3 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la Lobo est nettement plus développé sur sa rive gauche que sur sa rive droite (Figure 2). Les principaux affluents ont un régime permanent et leurs lits contiennent de l'eau en toute saison. Parfois en période pluvieuse, des crues sont observées. En période sèche, la très forte baisse des eaux et les lits des rivières laissent parfois des creux larges et entrecoupés par des flaques d'eau. Les eaux de la Lobo s'écoulent principalement dans la direction Nord-sud. La période de plus basses eaux est observée pendant les premiers mois de l'année (janvier et février). Le maximum annuel survient en septembre ou en octobre. La rivière Lobo est l'un des principaux affluents en rive gauche du fleuve Sassandra. La Lobo prend sa source à 400 m d'altitude au Sud de Séguéla et se jette dans le Sassandra, non loin de la localité de Loboville (Yao, 2015).

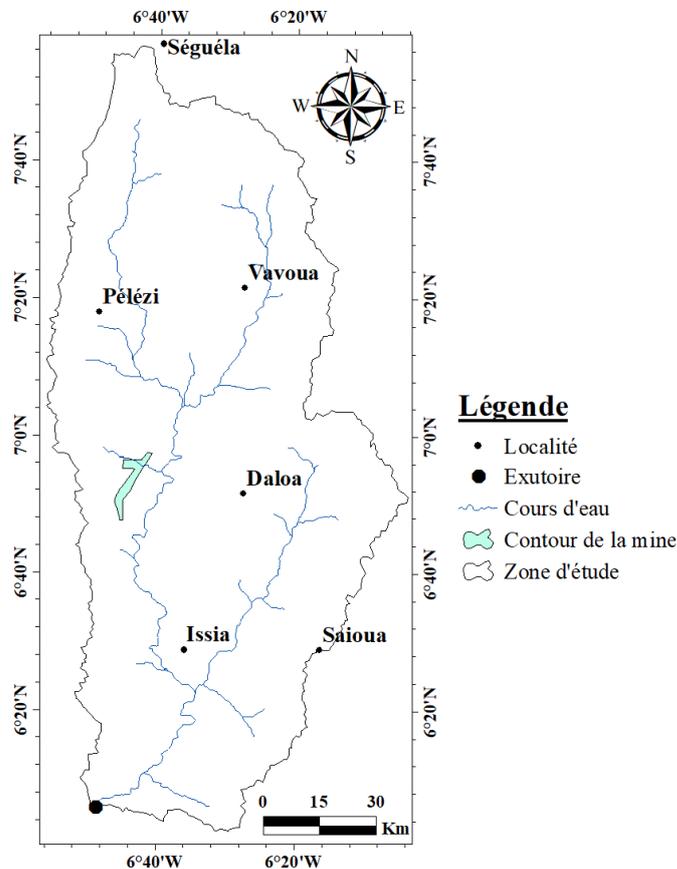


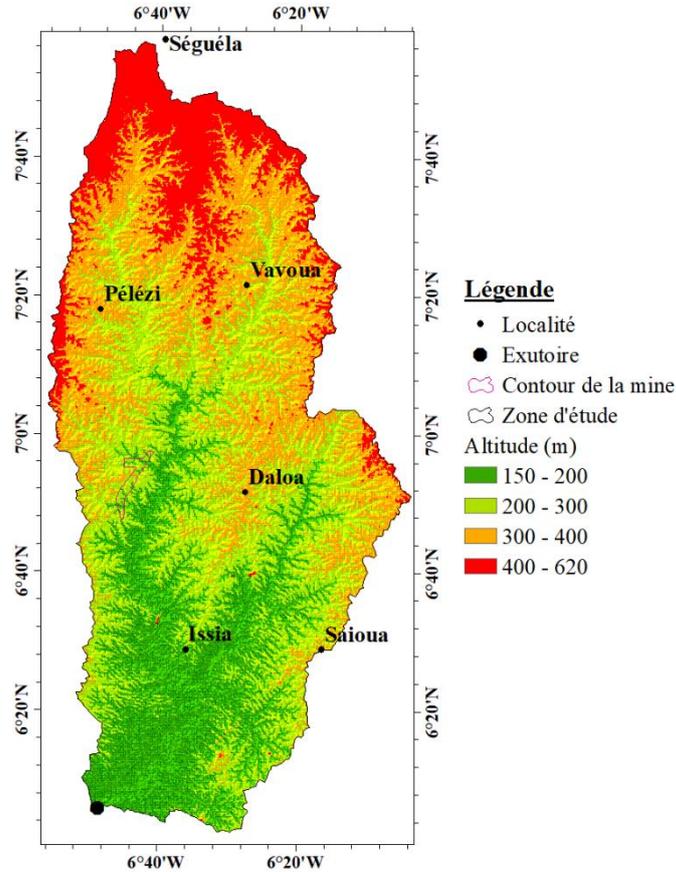
Figure 2 : Réseau hydrographique

### 1.1.4 Relief et Caractéristiques morphométriques du bassin versant de la Lobo

Du point de vue géomorphologique, le relief du bassin versant de la Lobo présente dans l'ensemble un relief peu contrasté et monotone. Malgré cette uniformité apparente, l'on distingue des plaines et des plateaux respectivement dans le Sud et le Nord du bassin. Ainsi, les

## GENERALITES

altitudes varient de 160 à 620 m (Figure 3). L'altitude moyenne est de 235,86 m et l'écart type est de 39,79 m.



**Figure 3 :** Relief du bassin versant de la Lobo

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la Lobo montrent qu'il a une forme allongée (Tableau I).

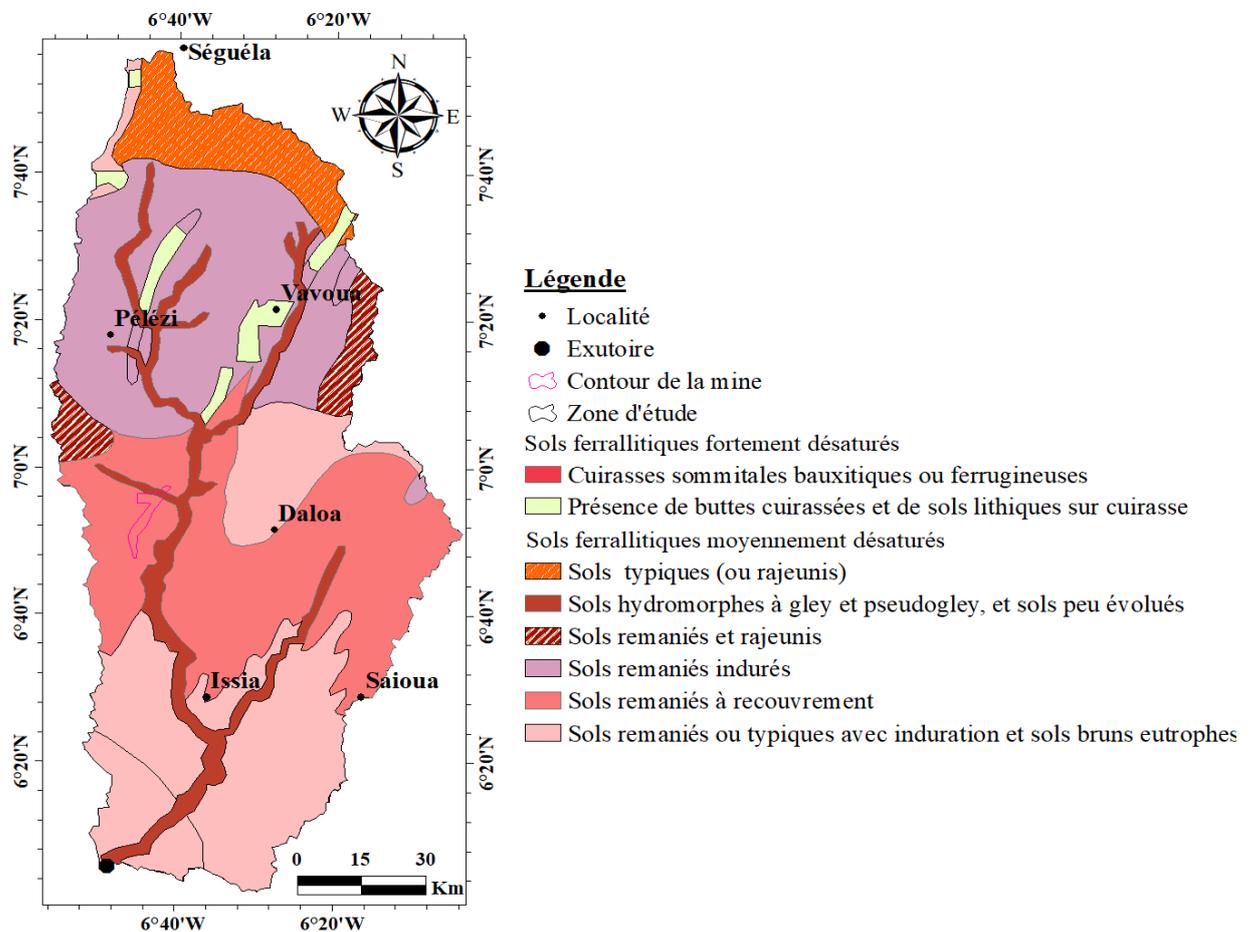
**Tableau I :** Caractéristiques physiques et morphométriques du bassin de la Lobo

Caractéristiques morphométriques	Lobo à Loboville
Superficie (km <sup>2</sup> )	12 722
Périmètre (km)	650
Indice de compacité (KC)	1,5
Longueur du rectangle équivalent (km)	247,20
Largeur du rectangle équivalent (km)	51,50
Altitude minimale (m)	150
Altitude maximale (m)	620
Pente longitudinale (m/km)	0,82

### 1.1.5 Sols

Les principales unités pédologiques rencontrées sur le bassin de la Lobo sont essentiellement de type ferrallitique (Figure 4). Selon les travaux de Perraud & Souchère (1969) *in* Yao (2015), les unités pédologiques se répartissent comme suit :

- les sols ferrallitiques fortement désaturés sous forte pluviométrie (>1 500 mm de pluie annuelle). Ces sols se rencontrent dans l'extrême sud-ouest du bassin ;
- les sols ferrallitiques fortement désaturés sous pluviométrie atténuée (<1 500 mm de pluie annuelle). Ils occupent la quasi-totalité du Sud et la partie centrale du bassin ;
- les sols ferrallitiques moyennement désaturés issus des granites sous une pluviométrie relativement faible se développent dans le Nord du bassin.



**Figure 4 :** Caractéristiques pédologiques du bassin versant de la Lobo

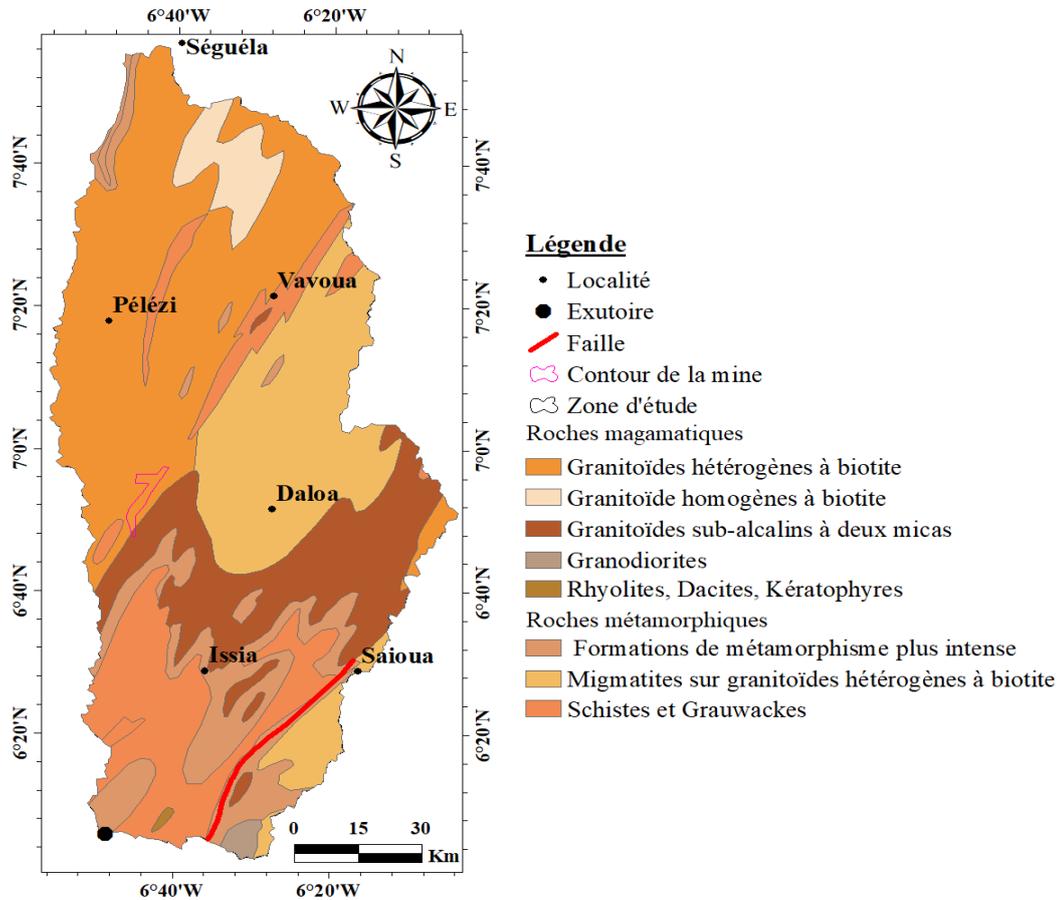
### 1.1.6 Contexte géologique et hydrogéologique

#### 1.1.6.1 Aperçu géologique

Selon les travaux de Ahimon (1990) ; Delor *et al.* (1995), les formations géologiques du bassin versant de la Lobo appartiennent principalement au socle précambrien (précambrien moyen) et

## GENERALITES

se regroupent en deux grandes entités que sont les roches magmatiques et les roches métamorphiques (Figure 5).



**Figure 5 :** Formations géologiques du bassin versant de la Lobo

Les roches magmatiques rencontrées sont de types plutoniques et volcaniques. Elles sont représentées essentiellement par les granitoïdes qui se rencontrent pratiquement dans la majeure partie du bassin. Quant aux roches métamorphiques, elles sont de type migmatites et schisteuses dans lesquelles est logé le lit de la rivière. Les faciès migmatitiques rencontrés dans la zone d'étude sont constitués par les migmatites anciennes, les migmatites rubanées et les leucomigmatites (Ligban, 2013).

### 1.1.6.2 Aperçu hydrogéologique

L'existence d'aquifère au niveau du bassin versant de la Lobo est conditionnée par la présence de fractures et de niveaux altérés. Ainsi, dans le bassin versant de la Lobo, il existe généralement deux types d'aquifères : les aquifères d'altérites (superficiels) et les aquifères fracturés (plus profonds). La recharge de ces deux aquifères se fait essentiellement par les précipitations météoriques.

### ✓ **Aquifères d'altérites**

Les altérites constituent le premier niveau de réservoir d'eau souterraine en milieu de socle cristallin et cristallophyllien (Yao, 2015). Ils présentent une porosité totale élevée avec une faible porosité efficace ainsi qu'une faible perméabilité. Ces différentes caractéristiques des altérites associées aux échanges avec les eaux de surface, réduisent le niveau d'eau en saison sèche (Maréchal *et al.*, 2004). Les aquifères des altérites est captée majoritairement par des puits (puits traditionnel) creusés par les populations.

### ✓ **Aquifère de fissures**

Les aquifères de fissures sont sous-jacents aux aquifères d'altérites. Ils constituent des réservoirs beaucoup plus importants avec une porosité efficace pratiquement nulle en dehors de sa partie supérieure. Ces aquifères de socles naissent généralement à la suite d'événements tectoniques qui affectent les niveaux supérieurs et moyens de l'écorce terrestre (Savadogo, 1984). Par rapport aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières et de la plupart des divers types de pollution. L'aquifère de fissure est capté principalement par des forages.

## **1.1.7 Aspects socio-économiques du bassin**

### **1.1.7.1 Population**

La population du bassin versant de la Lobo est estimée à 1 403 668 habitants en 2010 (Yao, 2015). Cette population essentiellement rurale est inégalement répartie sur les trois principaux départements du bassin à savoir 49 % pour le département de Daloa contre 27 % pour Vavoua et 24 % pour Issia. La prise en compte de la démographie est importante dans le domaine de la gestion des ressources car elle détermine les besoins futurs.

### **1.1.7.2 Activités économiques**

Les potentialités économiques du bassin versant de la Lobo favorisent les pratiques d'activités telles que l'agriculture, l'élevage, l'artisanat, le transport et l'exploitation minière de l'or. Les richesses du sous-sol ont attiré des orpailleurs clandestins venus en majorité du Burkina-Faso. Pour régulariser ce secteur, un permis de recherche, puis d'exploitation ont été attribués par l'Etat de Côte d'Ivoire, à la Société Tiebaya Gold respectivement en 2014 et 2020, pour une superficie de 385,5 km<sup>2</sup>. Parallèlement aux activités minières, le commerce y est développé dans le bassin. L'on y dénombre plusieurs établissements bancaires, hôteliers et scolaires ainsi que des restaurants et des centres de santé publics et privés.

### 1.1.8 Alimentation en eau potable de Issia

A Issia, l'alimentation en eau potable des populations est assurée dans les grandes agglomérations par le captage des eaux de surface. Les eaux brutes captées sur un seuil construit sur un bras de la Lobo en 1975, sont traitées et distribuées aux populations par la Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire (SODECI) (Figure 6).



**Figure 6** : Captage de l'eau brute et unité de potabilisation SODECI-Issia (Kandé, 2020)

En plus des eaux de surface distribué par la SODECI, une frange de la population s'approvisionne en eau à partir des eaux de source, de puits traditionnels, de rivières et de marigots (Kandé, 2020).

### 1.2 Impact des activités d'orpaillage sur la disponibilité en eau de surface

L'extraction peut épuiser des bassins d'eau souterraine et de surface. En effet, au Nevada, l'État le plus sec des États-Unis, l'on draine l'eau de la Humboldt River pour l'extraction de l'or le long de Carlin Trend. Des mines situées dans le Nord-est de cet état ont pompés plus de 580 milliards de gallons soit 2,2 milliards de m<sup>3</sup> d'eau entre 1986 et 2001 (assez pour alimenter les robinets de New-York pendant plus d'une année) (Bamba, 2012). En outre, il est important de préciser que les incidences sur la quantité et la qualité de l'eau sont parmi les aspects les plus litigieux des projets miniers. Les craintes pour la qualité et la quantité d'eau potable ont déclenché de nombreux et parfois violents conflits entre les mineurs et les collectivités (Bebbington & Williams, 2008). En somme dans la région du Boukani en Côte d'Ivoire, les impacts sur l'eau sont l'épuisement des ressources en eau (utilisation massive d'eau lors du fonçage), la pollution des eaux de surfaces, la destruction du lit de la rivière Binéda (Affessi *et al.*, 2016). Cette situation à même été constaté à Bianouan, où les habitants ont même été privés de leur principe

ressource en eau pendant un mois dû à la destruction de la rivière Bia utilisée par la SODECI pour l'approvisionnement de ladite localité. Cette destruction est la conséquence de l'exploitation illégale d'or dans le fleuve.

### **1.3 Notion d'imagerie et de télédétection**

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes (Wakpo, 2020). Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. L'image quant à elle se définit comme la représentation bidimensionnelle d'un objet, produite par la réflexion ou la réfraction de la lumière, ou plus simplement une matrice (Wiederkehr, 2013). Les images existent dans certaines longueurs d'onde (ultra-violet, visible, infrarouge, etc.) et peuvent être combinées en vue de différentes interprétations. Selon Wiederkehr (2013), les images satellitaires ont essentiellement quatre caractéristiques que sont : la résolution spatiale, la résolution spectrale, la résolution radiométrique et la résolution temporelle. La résolution spatiale est la taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer sur l'image. Généralement, plus la résolution spatiale augmente, plus la superficie visible du capteur diminue.

### **1.4 Modélisation**

La modélisation est définie comme la méthode qui permet de représenter un objet ou un phénomène du monde réel par une formule du système formel choisi (Anoh, 2014). Un modèle est une représentation sous une forme quelconque simplifiée d'un objet, d'un processus ou d'un système relativement abstrait en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir (Koua, 2014). Depuis quelques décennies, la modélisation et la projection de changement d'occupation des terres s'impose comme outil pertinent d'aide à la décision. Elle permet d'analyser les politiques de planification territoriale dans le but d'évaluer et d'anticiper leurs impacts environnementaux (Agbanou *et al.*, 2018). L'originalité de cette recherche réside dans le fait que la modélisation de la dynamique de l'occupation des terres permet de suivre la tendance évolutive du paysage et de trouver des règles acceptables pour préserver les ressources naturelles, notamment les ressources ligneuses de ce milieu. En hydrologie, la modélisation est une représentation mathématique simplifiée de tout ou d'une partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques (Neitsch *et al.*, 2005). C'est un outil qui permet de représenter sous une forme simplifiée les phénomènes naturels du cycle de l'eau sur un bassin

## GENERALITES

versant (Laborde & Morel, 1987). Les modèles hydrologiques ont en général une fonction de recherche car ils permettent :

- de réaliser des prédictions sur le comportement des systèmes (bassin versant, ou ouvrage hydraulique ou formation géologique etc.) considérés en réponse à des sollicitations considérées ;
- d'évaluer des prévisions (crues, sécheresse, gestion d'irrigation, d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ;
- de prévenir l'impact des infrastructures sur la qualité et la quantité de la ressource ;
- d'estimer l'évolution socio-économique des activités afin d'anticiper les aspects néfastes.

**DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET  
METHODES**

### **2.1 Données**

#### **2.1.1 Données climatiques**

Les données climatiques proviennent de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Elles concernent la pluie et la température journalière. Du fait de leur proximité et des périodes d'enregistrement, les postes pluviométriques de Daloa (2000-2017), Gagnoa (2000-2017) et Vavoua (1953-2011) ont été sollicités. Au niveau de la température, seule la station de Daloa avec des températures maximales et minimales journalière de 2000 à 2016 ont été utilisées.

#### **2.1.2 Données hydrométriques**

Les données hydrométriques collectées proviennent de la Direction des Normes, Réglementation et de la qualité (DNRQ) ; structure sous tutelle de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH). Les débits couvrent la période de 1992 à 2011 et sont au pas de temps mensuel.

#### **2.1.3 Données morphologiques**

Les données morphologiques obtenues auprès de la SODECI concernent les données physiques du réservoir et les volumes d'eau prélevés dans le réservoir. Les données physiques concernent la date de mise en marche du barrage et ses dimensions, notamment la hauteur d'eau normale, le volume du réservoir, la surface du réservoir.

#### **2.1.4 Données raster**

Les données rasters utilisées sont composées d'une carte et d'images satellitaires. La carte d'occupation du sol du bassin a été obtenue auprès du Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT). Elle a été établie à l'échelle de 1/900 000 et date de janvier 2012. Quant aux images satellitaires, elles se décomposent en images Landsat 7 ETM+ et Sentinelles-2. La prise en compte de ces dates est dictée non seulement par la présence d'orpailleurs mais aussi par la plage de couverture des données hydrométriques. Les images ont été téléchargées sur le site [www.usgs.earth.explorer.com](http://www.usgs.earth.explorer.com). Les images acquises en saison sèche ont été retenues. Cela permet non seulement de garder une cohérence dans la réponse spectrale mais également d'obtenir les différences spectrales les plus grandes sur la végétation naturelle dont la réponse spectrale se distinguera nettement des activités anthropiques. Les différentes images sélectionnées sont consignées en annexe 4.

### 2.2 Matériel de traitement

Pour la réalisation de cette étude, plusieurs logiciels ont été utilisés. Ce sont :

- ArcGIS 10.4.1, pour la cartographie ;
- Envi 5.3, pour le traitement numérique des images satellitaires ;
- Google Earth, pour la photo-interprétation des images satellitaires et la détermination de la matrice de confusion ;
- la version 2009 du modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et l'algorithme SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) du logiciel SWAT-CUP (Soil and Water Assessment Tool-Calibration Uncertainties Program), pour la modélisation agro-hydrologique ;
- MapInfo 7.5, pour la digitalisation de la carte d'occupation de sol de 2012 fournie par le CCT ;
- TERR-SET 18.31, pour la prévision à l'horizon 2050 de l'occupation du sol ;
- le tableur Excel 2019 pour le traitement statistique des données.

### 2.3 Méthodes

#### 2.3.1 Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol

La cartographie de la dynamique d'occupation du sol a reposé sur la télédétection et les SIG. Pour réaliser ces cartes, des images satellites prises par les capteurs des satellites Landsat 7 (2008 et 2013) et Sentinelle-2 (2019) ont été utilisées. L'extraction de l'information des images Landsat s'est déroulée à travers toute une série d'opérations regroupées en deux phases. Une première phase consacrée au prétraitement des images et la seconde, dédiée au traitement de l'image.

##### 2.3.1.1 Prétraitement d'image satellitaire

Le prétraitement des images satellitaires regroupe toutes les opérations qui sont effectuées dans le but de rendre les lots de données lisibles et superposables. Il s'agit des corrections géométriques et radiométriques, la correction des erreurs de balayage de Landsat 7, du mosaïquage et de l'extraction de la zone d'étude. Les images Sentinelle sont déjà corrigées sur les plans radiométrique et atmosphérique. Cependant, le mosaïquage s'est avéré nécessaire, étant donné que la zone d'étude est couverte par quatre scènes d'images Landsat et Sentinelle. Le mosaïquage a consisté à juxtaposer les bandes identiques des scènes entre elles pour former une plus grande. Pour l'extraction de la zone d'étude, la superposition du contour de la zone d'étude sur les images mosaïquées a été nécessaire.

### 2.3.1.2 Traitement des images satellitaires

Le traitement consiste à déterminer sous l'environnement Envi 5.3 pour les images Landsat 7 et ArcGis 10.4.1 pour les images Sentinelle-2, les différentes typologies d'occupation du sol présente dans la zone d'étude. Le traitement des images satellitaires a nécessité le calcul des indices tels que le Tasseled cap et le NDVI (Normalized Difference Végétation Index).

#### ✓ NDVI

L'Indice de Végétation Normalisé fait intervenir les canaux du Rouge (R) et du Proche Infra Rouge (PIR). Les différents indices de végétations ont pour effet d'augmenter le contraste au niveau des zones fortement végétalisées et d'en réduire ceux des autres classes présentes sur l'image satellitaire. Cet indice a pour but de donner des images dont les pixels mesurent les caractéristiques physiques et biologiques de la végétation (Toney *et al.*, 1999). Le NDVI qui varie de -1 à +1 se calcule selon l'équation 1 :

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad (\text{Equation 1})$$

#### ✓ Tasseled Cap

Il comprend plusieurs types d'indice. Dans le cadre de cette étude, les indices Brightness et Wetness ont été utilisés.

- Brightness Index (BI) ou indice de Brillance des sols (Crist & Cicone, 1984). C'est un indice sensible à la brillance des sols. Il permet de mieux discriminer les sols nus des autres classes d'occupation de sol. Il se calcule selon l'équation 2.

$$BI = (R^2 + PIR^2)^{1/2} \quad (\text{Equation 2})$$

- Wetness Index (WI) ou indice d'humidité (Crist & Cicone, 1984). Il maximise la réflectance de l'eau en utilisant la bande verte, et minimise celle des masses d'eau en utilisant le proche infrarouge. Il se calcule selon l'équation 3.

$$WI = \frac{PIR-MIR}{PIR+MIR} \quad (\text{Equation 3})$$

Le BI et le WI qui ont été appliqué sur les images Landsat 7 et Sentinelle-2 ont favorisé la détection des classes d'occupation du sol de la zone d'étude.

### 2.3.1.3 Composition colorée et interprétation visuelle d'image

La composition colorée est une combinaison des bandes spectrales. Elle repose sur le principe d'affectation des bandes d'image à trois plans d'affichage basé sur trois couleurs primaires : rouge (R), vert (V) et bleue (B). La composition colorée combinant les bandes 4-3-2 pour les

Landsat 7 et Sentinelle-2 fut réalisée. Cette opération a pour objectif de faire une synthèse d'informations en vue de faire une bonne discrimination des différentes classes d'occupation du sol présentes sur l'image.

### **2.3.1.4 Classification supervisée**

La classification supervisée est un processus de reconnaissance des formes et proportions des éléments présents sur une image satellitaire. En télédétection, elle consiste à effectuer la correspondance entre une scène de l'image matérialisée généralement par ses valeurs radiométriques et des classes connues a priori ou non par l'utilisateur (classes d'information) (Diouf, 2012). Suite aux compositions colorées, la détermination des différentes classes présentes sur l'image est primordiale pour effectuer la classification. Dans le cas de l'étude cette opération s'est faite sous ArcGis. En effet, la méthode de classification utilisée est le Maximum de vraisemblance. C'est une méthode qui calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée plutôt qu'à une autre. Les pixels sont affectés à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte. Cependant, si cette probabilité n'atteint pas le seuil escompté, le pixel est classé "inconnu". Elle s'est faite en deux étapes.

La première à consister à identifier les grands groupes d'occupations du sol à partir de l'interprétation visuelle. Cette interprétation des images qui a pour rôle d'établir une relation entre le terrain et l'image, a permis d'identifier sur les différentes images des détails comme :

- les forêts ;
- les forêts dégradées ;
- les plans d'eau ;
- les habitats et sols nus (bâtis, carrières, sols nus, routes) ;
- les cultures et jachères.

La seconde étape a permis de sélectionner par création de zone d'intérêt en fonction de chaque type d'entité des parcelles d'entraînement et la création d'un fichier de signature. Enfin, la qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide de la matrice de confusion et le coefficient de Kappa. La matrice de confusion affiche les statistiques de la précision de classification d'une image et le degré de classification erronée parmi les diverses classes (Eblin, 2014). Elle est calculée avec les valeurs exprimées en pixels et en pourcentage. Une classification est jugée acceptable lorsque la précision globale avoisine 80 % (Girard & Girard, 1999). Le coefficient Kappa évalué dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats obtenus (carte) et la vérité sur le terrain (Eblin, 2014). L'indice de Kappa s'étend de 0 à 1 et se divise en cinq catégories :

## MATERIEL ET METHODES

- 0 - 0,20 → accord très faible ;
- 0,21 - 0,40 → accord faible ;
- 0,41 - 0,60 → accord modéré ;
- 0,61 - 0,80 → accord substantiel ;
- 0,81 – 1 → accord presque parfait.

### 2.3.1.5 Vectorisation et représentation cartographique

La vectorisation représente la dernière étape du traitement des images. Elle a consisté à convertir les images classifiées du mode raster en mode vecteur dans le but de faciliter leur gestion dans le logiciel d'analyses SIG.

### 2.3.1.6 Taux moyen annuel d'expansion spatiale

Le taux moyen annuel d'expansion permet d'apprécier les changements intervenus au sein de chaque d'occupation du sol (Mama & Oloukoi, 2003). Les changements à l'échelle globale ont été déterminés en ressortant les superficies des différentes unités d'occupation des terres pour chaque période. Les changements ont été déterminés sur les trois (3) périodes que sont : la période 2008-2013, la période 2013-2019 et la période 2008-2019. Le taux de changement (Tc) ou taux moyen annuel d'expansion spatiale utilisé dans les études sur le changement d'occupation du sol (FAO, 1996) est traduit par les équations 4 et 5.

$$Tc = \left[ (S2/S1)^{\frac{1}{t}} - 1 \right] \times 100 \quad (\text{Equation 4})$$

$$Tg = [(S2 - S1)/S2] \times 100 \quad (\text{Equation 5})$$

avec Tc : taux de changement (Ou taux moyen annuel d'évolution) (%) ; Tg : le taux global de changement (%) ; S1 : la superficie d'une classe d'unité de surface à la date t1 ; S2 : la superficie de la même classe d'unité de surface à la date t2 ; t : nombre d'années entre les deux dates.

Une valeur positive de Tc indique une progression du changement d'occupation du sol, tandis qu'une valeur négative de Tc signifie une régression. En outre, une valeur de Tc proche de zéro indique que la variation de la classe est relativement faible.

### 2.3.1.7 Simulation du changement d'occupation de sol futur

La simulation du changement d'occupation du sol futur a été effectuée à partir du Land Change Modeler (LCM) du logiciel Terr-Set. Terr-Set s'appuie sur les connaissances passées et actuelles de l'occupation des terres pour prédire le futur. La série chronologique des cartes d'occupation du sol a été analysée pour détecter les changements. Le LCM fournit une évaluation quantitative des changements de classes d'utilisation des terres en termes de

## MATERIEL ET METHODES

changements nets, d'échanges, de gains, de pertes et de changements totaux. L'analyse des changements est effectuée sur les changements LULC (Land Use Land Cover) entre 2008 et 2013. Cette analyse permet d'identifier les zones modifiées d'une classe LULC de cette période donnée spatialement et quantitativement. L'objectif principal de cette étape est de :

- créer des cartes de potentiel de transition avec un degré acceptable de précision. Les cartes de potentiel de transition permettent de regrouper les transitions dans un ensemble de sous-modèles ;
- explorer le pouvoir potentiel des variables explicatives par le test de V de Cramer. Les variables utilisées pour la prévision 2050 de l'occupation de sol dans le cas de cette étape sont : la distance aux cours d'eau, distance aux routes, distance aux localités, pente et relief.

### 2.3.2 Quantification des flux d'eau de la retenue de Issia

La quantification des flux d'eau s'est faite à partir du modèle agro-hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool). SWAT est un modèle déterministe semi-distribué, à base physique qui fonctionne sur un pas de temps continue (Anoh, 2014). La mise en place du modèle SWAT requiert de passer par trois phases que sont le prétraitement, le traitement et le post-traitement.

#### 2.3.2.1 Prétraitement

Le prétraitement consiste à modifier et/ou ajuster certains aspects du code source du modèle en vue d'une adaptation aux conditions locales. Les paramètres concernés sont le fichier WGN relatif au climat et SOL, relatif à la pédologie.

#### 2.3.2.2 Traitement

La phase de traitement du modèle SWAT se fait en cinq (5) phases.

##### ✓ **Délimitation du bassin versant et de ses sous bassins versants**

L'extension ArcSWAT du logiciel ArcGIS délimite de façon automatique le bassin versant en utilisant un modèle numérique d'altitude (MNA). Toutefois, une correction est apportée au MNA. Cette correction a consisté à combler les valeurs aberrantes (puits, point très bas) afin d'éviter que ses valeurs influencent le sens de l'écoulement. Ainsi pour délimiter le bassin versant, le modèle procède à :

- **une délimitation des sous bassin et du bassin versant.** Afin d'augmenter la précision des résultats, un seuil d'apparition des écoulements est établi. Ce seuil de l'air des sous bassins a été fixé à 100 km<sup>2</sup> en se basant sur les travaux de Anoh (2014). Ainsi, 89 sous

## MATERIEL ET METHODES

bassins ont été délimités. Par ailleurs, pour délimiter le bassin versant, l'exutoire (la station hydrométrique de Loboville) a été renseigné au modèle. Le dernier réglage effectué dans cette section concerne l'intégration des paramètres du réservoir de la retenue d'Issia au modèle ;

### ✓ Définition de l'unité de réponse hydrologique (URH)

Les URHs sont les unités spatiales de base utilisées pour les calculs du modèle SWAT. Elles sont le résultat de la combinaison de trois éléments que sont la pente, la pédologie et le type d'occupation du sol dans les sous-bassins précédemment délimités. L'option « URH dominant » a été sélectionné (Anoh et al., 2021) ;

### ✓ Importation des données climatiques

Après la définition des URHs, les données climatiques journalières ont été renseignées dans le modèle. Il s'agit de la pluviométrie, de la température minimale et maximale.

### ✓ Création des tables d'entrée par le modèle

La création des tables d'entrée par le modèle est une récapitulation des différents fichiers nécessaire à la mise en place du modèle SWAT. Il s'agit des fichiers des caractéristiques physico-chimiques, des fichiers URHs, de chenaux d'écoulements, de l'usage du sol, des réservoirs et de la météorologie. SWAT offre par ailleurs, plusieurs options pour le calcul des termes du bilan hydrologique (Equation 9).

$$SW_t = SW_0 + \sum(R_{day} + Q_{surf} + E_a + W_{seep} + Q_{gw}) \quad (\text{Equation 6})$$

Avec  $SW_t$  : quantité finale d'eau dans le sol (mm) ;  $SW_0$  : quantité initiale d'eau dans le sol par jour (mm) ;  $R_{day}$  : précipitation totale journalière (mm) ;  $Q_{surf}$  : ruissellement total de surface journalière (mm) ;  $E_a$  : évapotranspiration totale journalière (mm) ;  $W_{seep}$  : quantité journalière d'eau entrant dans la zone vadose à partir du profil du sol (mm) ;  $Q_{gw}$  : quantité d'eau retournant dans le sol (mm).

Ainsi le ruissèlement a été déterminé à partir de la méthode SCS (Soil Conservation Service). L'infiltration a été calculée suivant la méthode de Green et Ampt et l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Hargreaves.

### ✓ Simulation

La simulation consiste principalement à tester la mise en marche du modèle et à définir le nombre d'années de mise en route. Aussi, permet-elle de configurer les conditions aux limites des différentes simulations afin de préciser au modèle la barre ou l'intervalle d'année dans lequel sont comprises les données. Elle inclut aussi le pas de temps dans lequel les sorties du

modèle seront livrées. Dans le cadre de cette étude, les restitutions ont été faites au pas de temps mensuels.

### **2.3.2.3 Post-traitement**

La phase de post-traitement consiste à évaluer la performance et la robustesse du modèle à reconstituer les écoulements. Elle peut se faire de façon manuelle ou automatique. L'option manuelle se déroule dans le modèle SWAT. Par contre, l'option automatique se fait dans le logiciel SWAT-CUP. Afin de gagner en temps, l'option automatique a été retenue. Le logiciel SWAT-CUP permet de rendre plus aisé l'optimisation du modèle SWAT. Pour ce faire, il présente cinq algorithmes que sont PSO, SUFI2, MCMC, GLUE et ParaSol. Parmi ces différentes approches la plus aisée à manier est le SUFI2, car elle offre une plage de paramètre plus grande (Taleb *et al.*, 2019).

#### **✓ Analyse de sensibilité du modèle**

Le modèle SWAT présente 629 paramètres à introduire pour obtenir une bonne performance du modèle. Dans cette étude, l'analyse de la sensibilité s'est basée sur les paramètres qui ont été jugés sensible dans la plupart des travaux sur la modélisation agro-hydrologique en Côte d'Ivoire ; notamment sur le bassin de Taabo par Anoh (2014) ; le bassin du lac de Buyo par Koua (2014) ; le bassin de la Loka par Atcho (2019) et le bassin de la Lobo Dibi *et al.* (2021). Les paramètres ayant fait l'objet d'analyse de sensibilité sont au nombre de 14 (Annexe 5).

#### **✓ Analyse des incertitudes**

L'analyse des incertitudes est basée sur les paramètres décideurs ou comparatifs décrivant l'incertitude régnant entre les données observées et celles simulées. Les paramètres sur lesquels repose la visualisation des incertitudes sont :

- les 95PPU « 95 pourcents de prédiction d'incertitude » : ils sont calculés aux niveaux de 2,5 et 97,5% de la distribution cumulative d'une variable de sortie obtenue par échantillonnage de Latin Hypercube (LH), refusant 5% des simulations très mauvaises. Il suppose que les incertitudes des paramètres d'entrées ont une distribution uniforme et celles de la sortie du modèle peuvent avoir jusqu'à 95% d'incertitude.
- P-facteur est le pourcentage d'observation ou d'apparition couverts par le 95PPU ;
- R-facteur est l'épaisseur de la bande 95PPU.

Le R-facteur et le P-facteur permettent de quantifier les incertitudes prises en compte par l'algorithme SUFI2. Lorsque le P-facteur tend vers 1, soit de 80 à 100% et le R-facteur tend vers 0 ; cela signifiera que les valeurs simulées sont significativement égales aux valeurs observées.

## MATERIEL ET METHODES

### ✓ **Fonction objectives**

Les fonctions objectives utilisées pour évaluer la performance du modèle sont le critère de Nash (NS) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ). Ces critères ont été retenus car ils représentent mieux la performance du modèle. D'ailleurs, ils sont les plus utilisés dans la plupart des études de modélisation (Anoh *et al.*, 2021).

### ✓ **Calibration et validation du modèle**

La calibration a été lancée sur la période de 2002 à 2006. Quant à la validation du modèle, elle couvre la période de 2007 à 2011. Il faut mentionner que 4 itérations de 50 simulations ont été nécessaires pour calibrer le modèle. La validation a utilisé les paramètres de la dernière simulation. Dans le cadre de la validation, une seule itération de 50 simulations a été nécessaire pour valider le modèle.

### ✓ **Evaluation prospective des flux d'eau**

Les flux d'eau futur ont été directement simulés par le model préalablement calibré. Les seuls paramètres qui ont variés concernent, l'occupation du sol de 2050 et les données climatiques journalières du scénario RCP 4.5. La période de 2011 à 2050 a été considéré comme futur vu que les données climatiques observées s'arrêtaient en 2011.

**TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET  
DISCUSSION**

### **3.1 Résultats**

#### **3.1.1 Dynamique de l'occupation du sol**

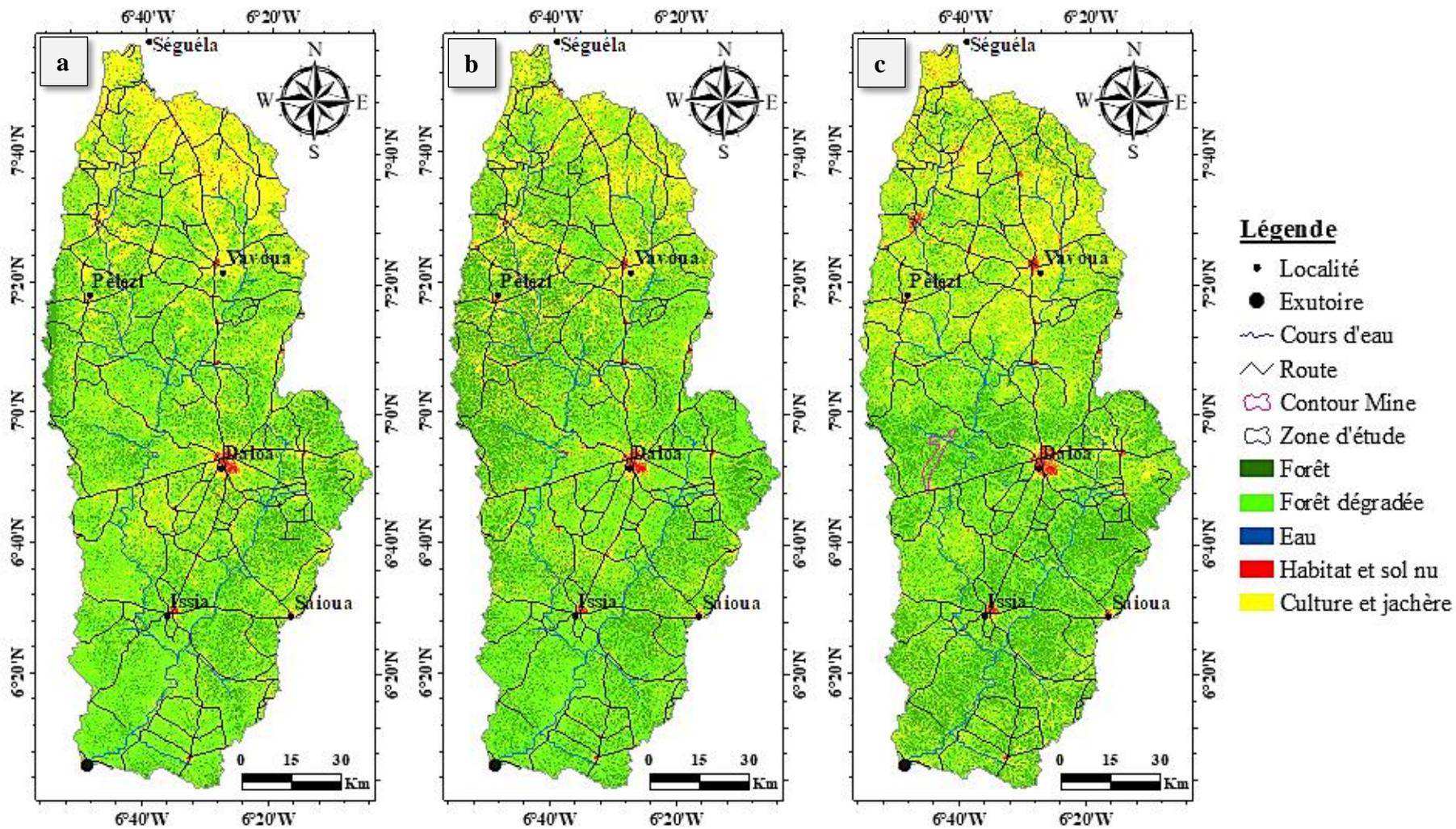
##### **3.1.1.1 Validation des classifications et résultats cartographiques**

La précision globale obtenue est de 90 % avec un coefficient de Kappa de 0,88 pour l'image de 2008. L'image de 2013 a une précision de 92 % et un coefficient de Kappa de 0,9. Quant à l'image de 2019, sa précision et son coefficient de Kappa sont respectivement de 95,33 % et 0,94. Les annexes 6, 7 et 8 donnent le détail de la qualité des classifications obtenues. Ces valeurs signifient que plus de 92,44 % des pixels des trois images ont été correctement classés. De façon globale, les valeurs des différents indicateurs de précision de la classification supervisée obtenues pour les différentes images, traduisent d'une part, de la bonne qualité des échantillons et d'autre part, de la bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale contenue dans les images.

##### **3.1.1.2 Dynamique de l'occupation du sol de la zone d'étude**

Les cartes d'occupations du sol de 2008, 2013 et 2019 issues de la classification des images sont présentées à la figure 7. L'évolution des superficies des différents types d'occupation du sol entre 2008 et 2019 est résumé dans le tableau II.

## RESULTATS ET DISCUSSION



a-Occupation du sol en 2008

b-Occupation du sol en 2013

c-Occupation du sol en 2019

Figure 7 : Evolution de l'occupation du sol de 2008 à 2019

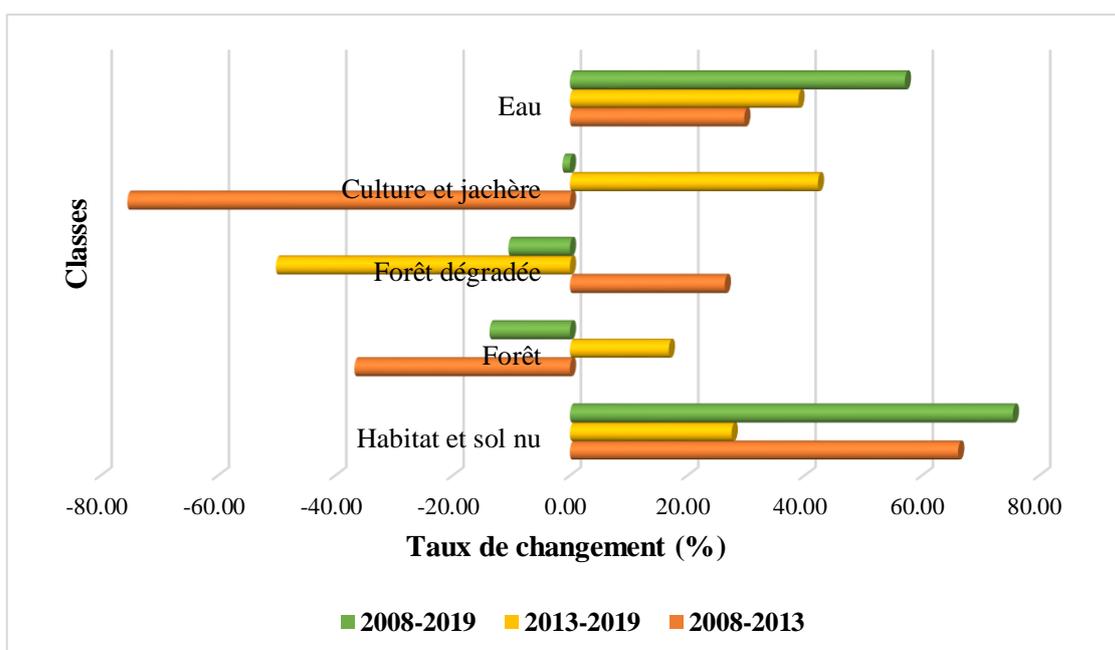
## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau II** : Superficies des occupations du sol en Hectare et leurs proportions en pourcentage

Classes	2008		2013		2019	
	Superficie (Ha)	Pourcentage (%)	Superficie (Ha)	Pourcentage (%)	Superficie (Ha)	Pourcentage (%)
<b>Habitat et sol nu</b>	34 714,88	2,73	102 640,12	8,07	141 706,73	11,14
<b>Forêt</b>	487 799,17	38,34	356 735,75	28,04	429 010,31	33,72
<b>Forêt dégradée</b>	487 690,29	38,33	662 575,35	52,08	441 372,38	34,69
<b>Culture et jachère</b>	260 914,76	20,51	148 710,83	11,69	257 591,35	20,25
<b>Eau</b>	1 080,90	0,08	1 537,95	0,12	2 519,23	0,20
<b>Total</b>	1 272 200	100	1 272 200	100	1 272 200	100

### 3.1.1.3 Taux de changement des différents types d'occupation du sol

L'estimation de l'accroissement global des superficies des différentes classes d'occupation du sol a été possible grâce au taux de changement global. L'évaluation de l'évolution de l'occupation du sol permet de mettre en évidence les changements (proportion de gain ou de perte) qui sont intervenus entre les différentes périodes : 2008-2013 ; 2013-2019 et 2008-2019. Aussi le taux moyen annuel d'expansion spatiale et le taux de changement ont-ils été calculés sur la base des superficies de ces unités (Annexe 9). La figure 8 présente le taux de changement global sur toute la période de l'étude de 2008 à 2019.



**Figure 8** : Evolution spatiale globale des classes d'occupation de 2008 à 2019

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les valeurs positives indiquent une progression tandis que les valeurs négatives, une régression. Les valeurs proches de zéro indiquent que la classe reste relativement stable. On constate une grande progression des plans d'eau et Habitats et sol nu au détriment surtout des forêts, forêts dégradées, culture et jachère de 2008 à 2019.

### 3.1.1.4 Prédiction de l'occupation du sol en 2050

La prévision basée sur LCM pour 2050 montre que les habitats et sols nus augmenteront de 141 707 ha à 180 560 ha entre 2019 et 2050. Les cultures et jachères augmenteront également de 257 591 ha à 1 018 867 ha entre 2019 et 2050. Par contre, la forêt, la forêt dégradée et l'eau diminueront de respectivement de 429 010 ha à 24 246 ha, 441 372 ha à 48 300 ha et de 2 519 ha à 227 entre 2019 et 2050 (Figure 9).

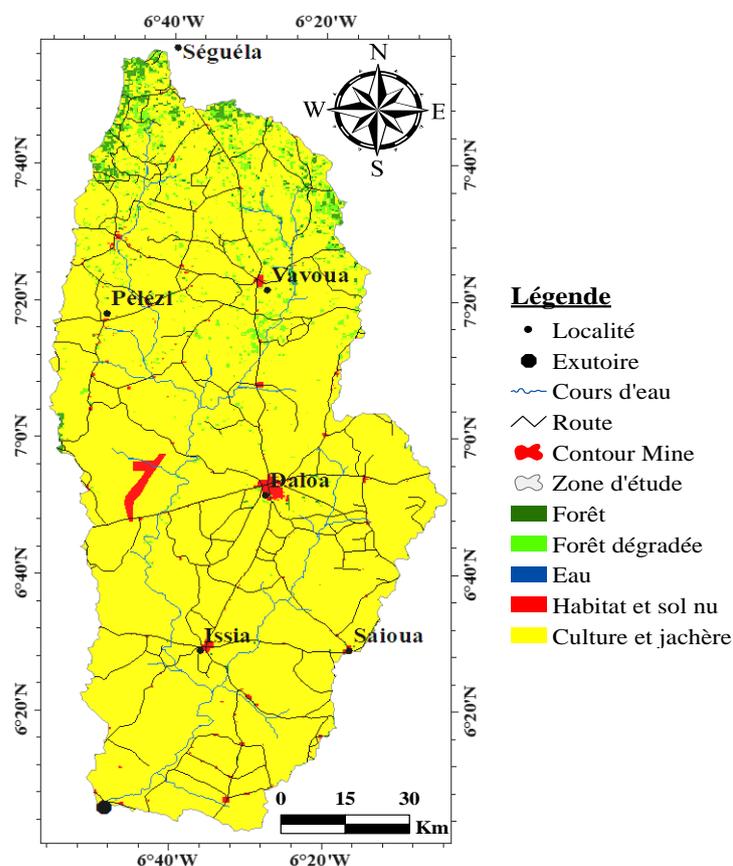


Figure 9 : Occupation de sol en 2050

L'analyse montre une grande progression des cultures et jachères, des habitats et sols nus et une régression des forêts, forêts dégradées et eau est observée sur la période de 2019 à 2050. Malheureusement, la progression se fera au prix de la diminution des changements dans les des forêts, forêts dégradées et eau.

### 3.1.2 Restitution des débits de la retenue de Issia à l'aide du modèle SWAT

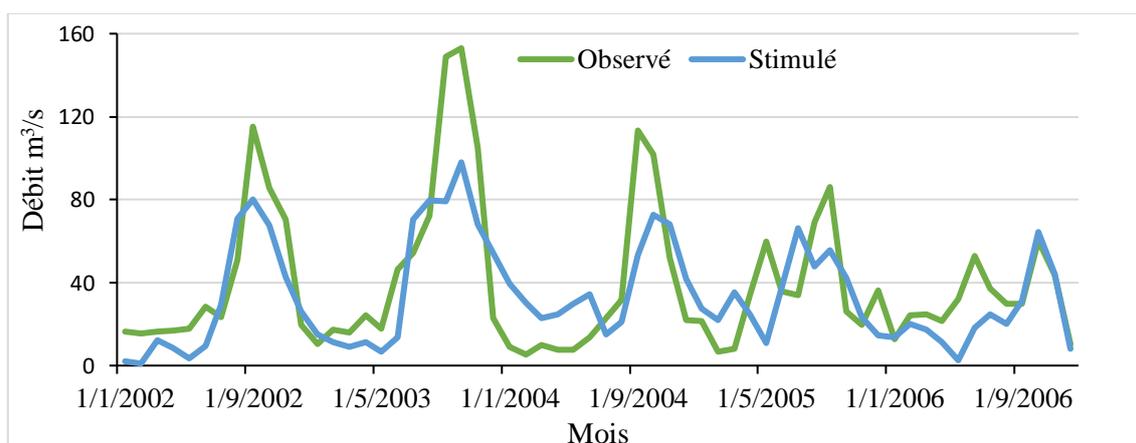
#### 3.1.2.1 Calibration du modèle SWAT

Les critères statistiques ont montré une bonne performance du modèle. En effet, le NS et  $R^2$  sont supérieurs à 0,5. Par ailleurs les paramètres p-facteur et r-facteur montrent une bonne prise en compte des incertitudes, bien que nombreuses. En outre les paramètres du Tableau III ont permis d'apprécier la capacité du modèle à reproduire les phénomènes observés.

**Tableau III** : Paramètres d'évaluations de la performance de la calibration (2002-2006)

N° du sous bassin	p_facteur	r_facteur	R <sup>2</sup>	NS
89	0,63	1,19	0,57	0,53

La figure 10 présente la courbe des données observées et simulées. Son analyse montre qu'il y a une grande corrélation entre les données observées et simulées. Nous pouvons dire que le modèle a bien reproduit les données observées. Cependant, il y a une légère sous-estimation des débits simulés au niveau des crues.



**Figure 10** : Calibration du modèle SWAT

#### 3.1.2.2 Validation du modèle SWAT

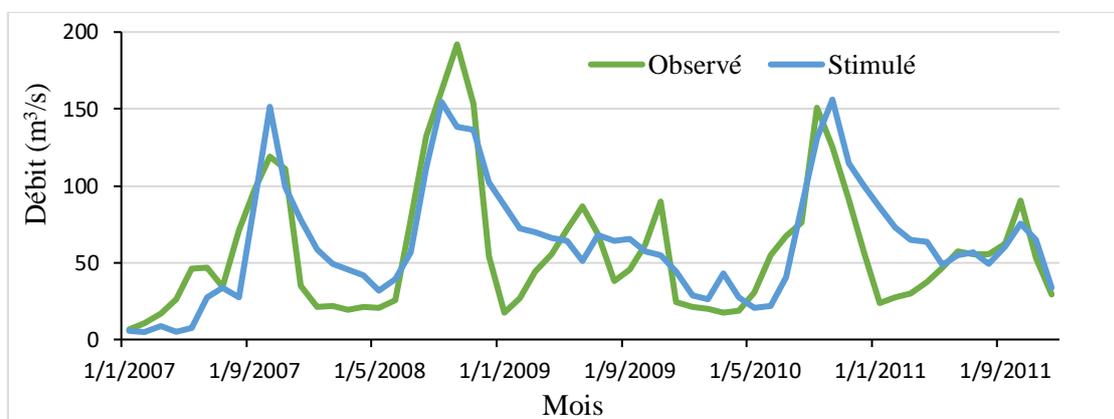
Le tableau IV montre les valeurs résultantes des différents outils d'évaluation de la performance du modèle lors de la validation. L'analyse statistique des résultats de la validation donne des valeurs satisfaisantes du p-facteur, r-facteur,  $R^2$  et NS.

**Tableau IV** : Paramètres d'évaluations de la performance de la calibration (2007-2011)

N° du sous bassin	p_factor	r_factor	R <sup>2</sup>	NS
89	0,75	1,54	0,61	0,57

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de la validation du modèle de manière graphique (Figure 12) montrent une grande similitude entre les débits observés et les débits simulés. Toutefois, il y a une surestimation des débits simulés durant les mois de Septembre à Novembre 2007. Tandis qu'il y a une sous-estimation des débits simulés sur le reste de la période de validation.



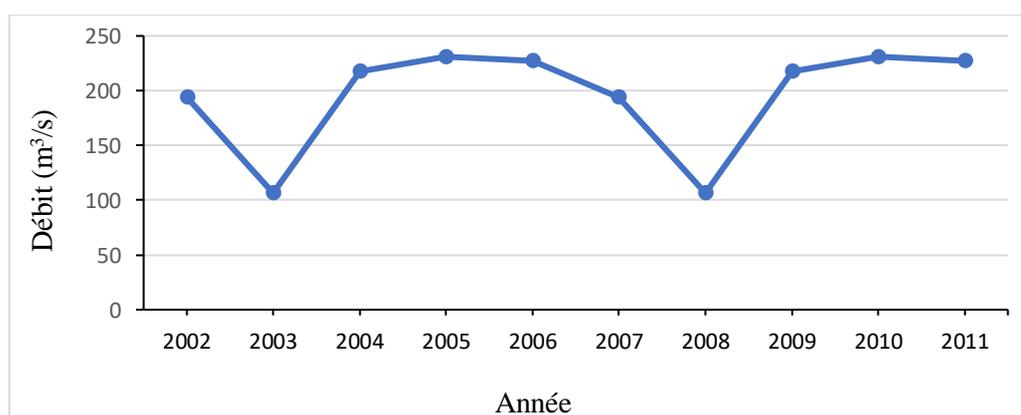
**Figure 11** : Validation du model SWAT

### 3.1.2.3 Quantification du flux d'eau entrant dans la retenue

L'estimation des flux d'eau entrant dans le réservoir a permis d'obtenir les débits d'eau entrant dans le réservoir et la quantité d'eau évaporée au-dessus de la retenue de Issia. Ces différents flux couvrent la période de 2002 à 2011.

#### ➤ Débits d'eau entrant le réservoir

Les débits annuels entrant dans le réservoir sont représentés respectivement par la figure 13.

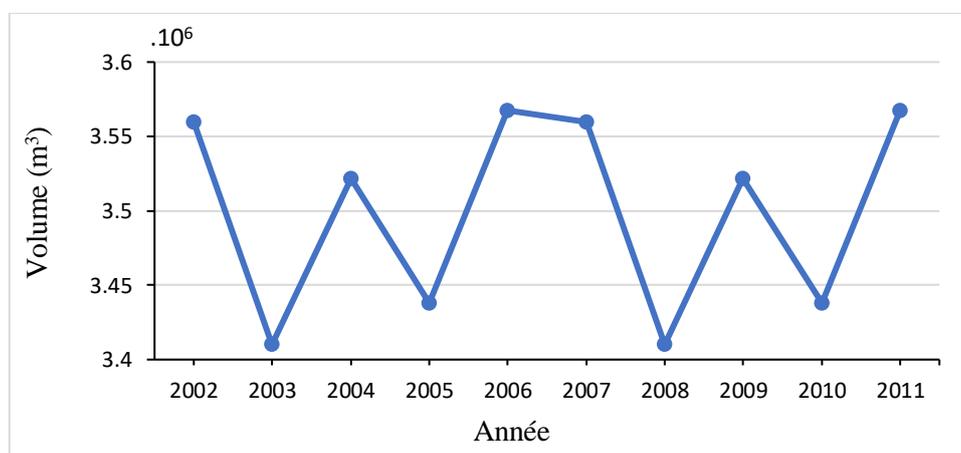


**Figure 12** : Evolution des débits annuels dans la retenue de Issia

Les débits d'eau entrant oscillent entre  $106,45 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $231,03 \text{ m}^3/\text{s}$  par année correspondant respectivement aux lames d'eau de  $263,87 \text{ mm}$  et  $572,62 \text{ mm}$  par année. Le débit d'eau moyen inter annuel entrant dans la retenue est de  $1\,951,83 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit une lame d'eau moyenne de  $4\,840,49 \text{ mm}$  sur la période de 2002 à 2011.

### 3.1.2.4 Evaporation moyenne de la quantité d'eau au-dessus de la retenue

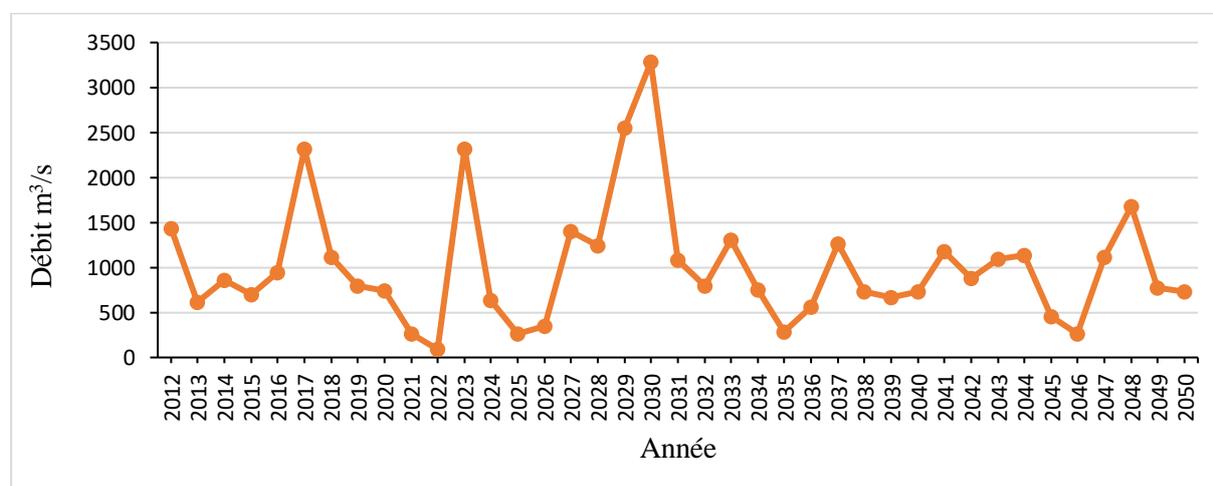
La figure 14 présente la quantité moyenne d'eau évaporée par mois dans la période de 2002 à 2011. La courbe représentative de l'évaporation oscille de 3 410 100 m<sup>3</sup> à 3 567 500 m<sup>3</sup> avec une moyenne interannuelle de 3 499 400 m<sup>3</sup>.



**Figure 13 :** Volume interannuel d'eau évaporée au-dessus de la retenue

### 3.1.2.5 Simulation des flux d'eau futur entrant dans la retenue d'Issia

La courbe interannuelle de la lame d'eau présentée par la figure 15 permet d'observer l'évolution des débits d'eau entrant dans le futur (2012-2050).



**Figure 14 :** lame d'eau futur entrant dans la retenue de Issia

La courbe présente deux tendances caractérisées par l'évolution du débit entrant dans la retenue. En effet, la première tendance de 2012 à 2032 est marquée par une évolution rapide des débits qui oscillent entre 89,82 m<sup>3</sup>/s à 3 282,3 m<sup>3</sup>/s futur entrant dans la retenue correspondant respectivement à des lames d'eau de 222,65 mm et 8 136,35 mm. Par contre celle de 2032 à 2050 est marquée par une évolution lente des débits futurs entrant dans la retenue qui varient

## RESULTATS ET DISCUSSION

de 262,12 m<sup>3</sup>/s à 1 682,84 m<sup>3</sup>/s, respectivement à des lames d'eau de 649,77 mm et 4 171,52 mm. De ces deux tendances le débit le plus bas est enregistré dans la première tendance.

### 3.1.2.6 Evaporation future moyenne de la quantité d'eau au-dessus de la retenue

La variation interannuelle de l'évaporation moyenne au-dessus du réservoir de 2012 à 2050 est comprise entre 2 692 700 m<sup>3</sup> et 2 983 200 m<sup>3</sup> (Figure 16). Sur toute la durée de l'étude, le constat est que l'évaporation est maximale en 2025. A l'inverse, elle sera très faible en 2033.

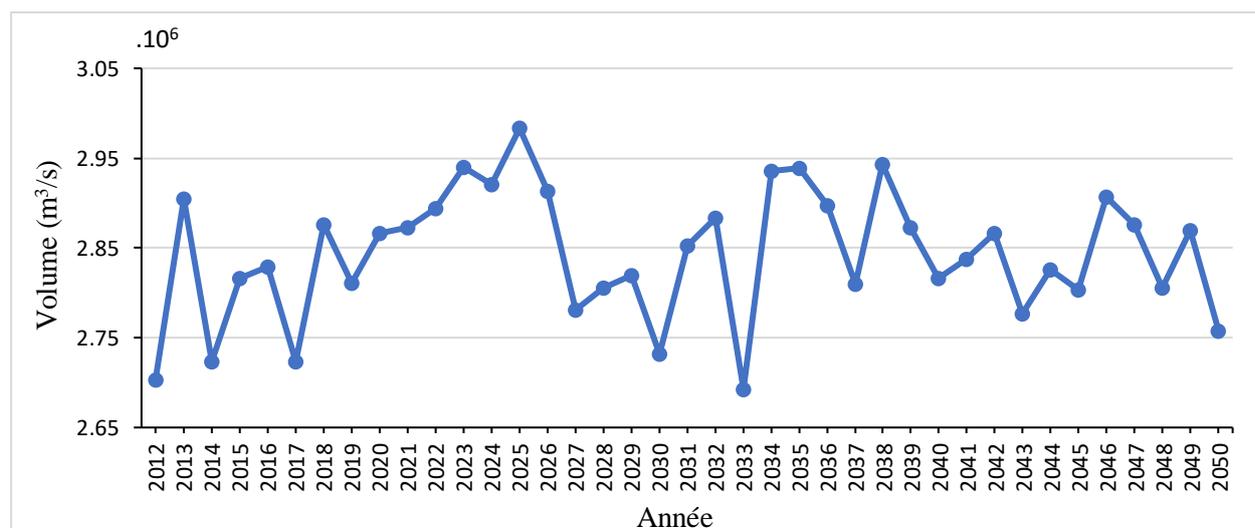


Figure 15 : Quantité d'eau évaporée de la retenue de Issia

## 3.2 Discussion

Dans le cadre de cette étude, les images Landsat 7 et Sentinelle-2 ont été utilisées. La classification par vraisemblance adoptée a permis d'obtenir des précisions globales de 90 %, 92 % et 95,33 % respectivement pour les images de 2008 ; 2013 et 2019. La difficulté à discriminer visuellement ces classes peut être due à des signatures spectrales similaires entre chaque classe d'occupation de sol. Les coefficients de Kappa respectifs obtenus sont de 0,88 ; 0,9 et 0,94. Bien que, de nombreuses confusions ont été constatées lors de la classification des images, la précision globale obtenue est au-dessus de 80 % préconisé par Girard & Girard (1999). Ces résultats concordent aussi avec ceux obtenus par Soro *et al.* (2014) qui ont utilisé des images satellitaires multi-dates dans le suivi et l'analyse spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs. Les précisions globales obtenues par ces derniers pour les images classifiées sont de 88,47 % et 90,46 % respectivement pour 1986 et 2002. Cette étude est également en accord avec les travaux de Tia *et al.* (2018). Ces auteurs ont obtenu des précisions globales de 91,48 % pour 2007 et 88,56 % pour 2016 dans leur étude sur les impacts

## RESULTATS ET DISCUSSION

des exploitations aurifères industrielles sur le milieu naturel et les populations à Bonikro. De façon globale, la tendance évolutive des formations végétales à l'horizon 2050 dans la zone d'étude est régressive. Tandis que celle des formations anthropiques évoluent de façon progressive. Ces résultats concordent avec ceux de Orekan (2007) qui a montré que dans la région centrale du Bénin d'importance superficielle de forêts vont disparaître au profit des mosaïques de cultures et jachères d'ici 2025. Cette étude concorde également avec les travaux de Abdus *et al.* (2017) mené sur Punjab une province du Pakistan. Ces auteurs expliquent la forte demande des terres cultivées et du bâti par l'augmentation de la population.

La restitution des flux d'eau de la retenue d'Issia à l'aide du modèle Agro-Hydrologique SWAT, a permis d'obtenir des résultats satisfaisants lors de la calibration et de la validation du modèle. Les critères d'optimisation du modèle que sont le coefficient de Nash et le coefficient de détermination, respectivement de 0,53 et 0,57 pour la calibration, et de 0,57 et 0,61 pour la validation montrent un bon synchronisme entre les valeurs observées et simulées. Les résultats obtenus ont été entravés par beaucoup de lacunes. En effet, les données climatiques utilisées ne sont pas assez représentatives. Selon Anoh (2014), la représentation des stations climatiques qui ne couvrent pas tous les régimes climatiques aura un impact négatif sur la restitution des écoulements. Malgré ces limites, le modèle a bien pu reconstituer les flux d'eau de la retenue de Issia. Ainsi, les flux d'eau entrant dans le réservoir de Issia, sur la période de 2002 à 2011, présentent un débit moyen inter annuel de  $1\,951,83\text{ m}^3/\text{s}$  soit une lame d'eau moyenne de  $4\,840,49\text{ mm}$ . A l'horizon 2050 (2030-2050), les lames d'eau entrant dans le réservoir devraient baisser de 52 %. Ces différents changements seraient imputables à la conjugaison de l'anthropisation et du changement climatique avec pour corolaire l'augmentation de gaz à effet de serre tel que le  $\text{CO}_2$ . Les résultats confirment les travaux de l'IPCC (2008) et Koua *et al.* (2014). En effet, à l'horizon 2080-2099, les écoulements en Afrique de l'Ouest, calculés sur la base du scénario d'émission A1B, pourraient baisser jusqu'à 50 % (IPCC, 2008 ; Koua *et al.*, 2014). Selon IUCN (2004), bien que les prévisions en ce qui concerne les écoulements varient grandement au plan régional, la plupart des scénarii de changements climatiques font état de baisse des écoulements dans les pays arides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest.

## **CONCLUSION**

## CONCLUSION

Ce travail portant sur les impacts des activités clandestines de l'or sur le bilan hydrique de la retenue de Issia dans le périmètre minier de Tiebaya a été réalisé dans le but d'évaluer l'incidence de ces impacts sur le flux d'eau. L'approche méthodologique adoptée pour atteindre cet objectif a consisté à une analyse diachronique des images Landsat 7 ETM+ (2008 et 2013) et Sentinelle-2 (2019) et à une quantification du flux d'eau actuel ainsi que la simulation du flux d'eau futur entrant dans la retenue de Issia.

L'analyse diachronique des images satellitaires, par la méthode de classification supervisée par le maximum de vraisemblance, a permis de discriminer 5 classes d'occupation de sol que sont : forêt, forêt dégradée, habitat et sol nu, culture et jachère, eaux. Les précisions globales obtenus pour les images classifiées de 2008, 2013 et 2019 sont respectivement 90 % ; 92 % et 95,33 %. Les indices de Kappa de la matrice de confusion pour les trois images classifiées sont de 0,88 (2008), 0,9 (2013) et 0,94 (2019). Les cartes élaborées pour les trois années ont permis d'identifier une évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol. De 2008 à 2019, des taux moyen annuel de régression globale pour la forêt (13,70 %), forêt dégradée (10,49 %) et les culture et jachères (1,29 %). Parallèlement, dans la même période, une progression des habitats et sols nus (75,50 %) et eau (57,09 %) a été observée.

La quantification des flux d'eau de la retenue de Issia a été réalisée à l'aide du modèle agro-hydrologique SWAT. Le modèle SWAT est mis en œuvre pour la période allant de 2002 à 2006 pour la calibration et de 2007 à 2011 pour la validation. La comparaison graphique des débits observés et simulés pendant la période de calage et de validation a permis de mettre en relief la capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante les séries de débits à l'échelle mensuelle. L'analyse du bilan hydrique indique que le flux d'eau de la retenue baissera de 52% rapport aux flux actuels. Ces diminutions constituent une menace réelle pour la population du bassin versant dans les années à venir.

Les préoccupations d'ordre environnementales ne sont généralement pas des priorités des communautés qui sont principalement mobilisées autour d'enjeux de survie quotidienne. A partir de ces résultats, il convient de formuler quelques perspectives pour approfondir cette étude :

- faire un grand nombre de prélèvements des eaux de surfaces et souterraines dans le périmètre minier et à proximité du périmètre minier ;
- analyser les ressources en eau et les sédiments pour déterminer leur niveau de contamination par les substances chimiques (cyanure et mercure) utilisées par les orpailleurs ;

## CONCLUSION

- augmenter le pas de temps entre les années pour une meilleure évaluation de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la zone d'étude ;
- faire une visite de terrain de la zone d'étude pour valider les cartes d'occupation de sol ;
- détecter automatiquement les sites d'orpillage clandestin à partir de modèle de prédiction ;
- faire des enquêtes socio-économiques afin de sensibiliser les communautés locales sur la préservation de l'environnement ainsi que les ressources en eau.
- utiliser de données climatique locale, plus représentatif pour la modélisation futur.

## **REFERENCES**

## REFERENCES

- Abdus S., Xiangzheng D., Siqi J. & Dongdong C. (2017). Scenario-Based Simulation on Dynamics of Land-Use-Land-Cover Change in Punjab Province, Pakistan. *Sustainability*, 9 : 1-17.
- Affessi A.S., Koffi K.G.J.-C. & Sangaré M. (2016). Impacts sociaux et environnementaux de l'orpaillage sur les populations de la région du Bounkani (Cote d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12(26) : 288-306.
- Agbanou T., Paegelow M., Toko I.I. & Tente B. (2018). Modélisation des changements d'occupation des terres en région soudanienne au Nord-ouest du Benin. *European Scientific Journal*, 14(12) : 248-266.
- Ahimon O.A. (1990). Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000, feuille de Daloa. Direction de la géologie, Abidjan, 28 p.
- Ahoussi K.E., Soro N., Koffi Y.B., Soro G. & Biemi J. (2010). Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(3) : 782-797.
- Anoh K.A. (2014). Apport d'un SIG et du modèle agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 218 p.
- Anoh K.A., Koua T.J.-J., Yeo W.E., Eblin S.G., Kouamé K.J. & Jourda J.P. (2021). Application of the agro-hydrologic SWAT model on the Taabo river basin (Côte d'Ivoire) to evaluate the effect of three vegetative filter strip scenarios on streamflow and nutrients. *Environmental Engineering & Management Journal*, 20(1) : 13-23.
- Atcho A.V. (2019). Évaluation de la disponibilité de l'eau de la retenue de la Loka dans un contexte d'anthropisation et de changement climatique (Bouaké, Centre de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Génie de l'Eau et de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 52 p.
- Bamba Y. (2012). Evaluation des impacts de l'exploitation de la mine d'or de Bonikro (Côte d'Ivoire) sur les ressources en eau. Mémoire de Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Burkina-Faso, 44 p.

## REFERENCES

- Bebbington A. & Williams M. (2008). Water and Mining Conflicts in Peru. *Mountain Research and Development*, 28(3/4) : 190-195.
- Cissé F.B. (2019). Etude des impacts de l'exploitation artisanale de l'or en république de guinée (cas de la préfecture de Siguiri). Mémoire de Maîtrise en Sciences de l'Environnement, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada, 176 p.
- Crist E.P. & Cicone R.C. (1984). A physically based transformation of thematic mapper data the TM tasseled cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 22(3) : 256-263.
- Delor C., Simeon Y., Vidal M., Zeade Z., Kone Y. & Adou M. (1995). Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Séguéla. Mémoire n°9 de la Direction des Mines et de la Géologie, Abidjan, 19 p.
- Dibi B., Anoh K.A., Konan-Waidhet A.B., Koua T.J.-J. & Kouassi K.L. (2021). Couplage de la modélisation et de la télédétection pour la détermination des points d'implantation de forage à haut débit dans le bassin versant de la Lobo à Nibehibé en Côte d'Ivoire. *WASH & TI Journal*, 5(2) : 578-587.
- Diouf A. (2012). Influence du régime des feux d'aménagement sur la structure ligneuse des savanes nord Soudaniennes dans le Parc du W (Sud-ouest du Niger). Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles (Bruxelles, Belgique), 207 p.
- Eblin G.S. (2014). Dégradation des écosystèmes environnementaux dans la région d'Adiaké (Sud-est côtier de la Côte d'Ivoire) et risque de pollution des eaux : apport d'un SIG. Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 185 p.
- Elbaz-Poulichet F., Seidel J.L., Devez A., Van-Exter S., Casellas C., Voltz M. & Andrieux P. (2003). Dynamique et origine des éléments traces dans une rivière méditerranéenne (la Peyne) : Relations avec la lithologie, les rejets et les pratiques agricoles. *IAHS-AISH publication*, 278 : 410-416.
- Fadil F., Maarouf A. & Zaid A. (1997). Utilisation de *Gammarus gauthieri* pour tester la toxicité des sédiments des eaux douces. *Limnol*, 32 : 73-78.
- FAO (1996). Forest resources assessment 1990. Survey tropical forest cover studies of change processes. FAO Forestry Paper 130, Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, Italie <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm> (consulté le 12 Août 2021).

## REFERENCES

- Girard M.C. & Girard C.M. (1999). *Traitement des Données de Télédétection*. Dunod, Paris, France, 529 p.
- IPCC (2008). *Climate Change and Water. Rapport Technique IV*, 214 p.
- IUCN (2004). *Réduire la Vulnérabilité de l’Afrique de l’Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et désertification, éléments de stratégie régionale de préparation et d’adaptation*, <http://www.iucn.org/bookstore>. (Consulté le 23 Août 2021).
- Jaques E., Zida B., Billa M., Greffie C. & Thomassin J.F. (Eds.) (2003). *La filière artisanale de l’or au Burkina Faso : bilan, perspectives d’évolution et recherche de cibles pour le développement de petites mines*. In : MAE/CIFEG regional workshop. Ouagadougou (Burkina-Faso) : pp. 41-59.
- Kandé V. (2020). *Modélisation du réseau d’alimentation en eau potable de la ville d’Issia, Centre-ouest de la Côte d’Ivoire*. Mémoire de Master en Génie de l’Eau et de l’Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa (Côte d’Ivoire), 55 p.
- Keita S. (2001). *Etude sur les mines artisanales et les exploitations minières à petite échelle au Mali*. Rapport de MMSD de l’IIED, 53 p.
- Koffi Y.D. (2015). *Impact de l’exploitation minière artisanale de l’or sur les eaux de surface à Hiré (Côte d’Ivoire)*. Mémoire de Master en Science et Gestion de l’Environnement, Université Nanguy Abrogoua, Abidjan, Côte d’Ivoire, 56 p.
- Konan K.H. (2019). *La gestion participative, une solution à l’orpaillage Clandestin au Nord de la Cote d’Ivoire*. *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, 7 : 105-117.
- Koua T.J.-J. (2014). *Apport de la modélisation hydrologique et des systèmes d’information géographique (SIG) dans l’étude du transfert des polluants et des impacts climatiques sur les ressources en eau : cas du bassin versant du lac de Buyo (Sud-ouest de la Côte d’Ivoire)*. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d’Ivoire), 229 p.
- Koua T.J.-J., Jourda J.P., Kouamé K.J., Anoh K.A., Balin D. & Lane S.N. (2014). *Potential climate change impacts on water resources in the Buyo Lake Basin (Southwest of Ivory Coast)*. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 8(3) : 1094-1111.

## REFERENCES

- Kouakou A.P. (2018). La gouvernance locale dans la lutte contre l'orpaillage clandestin en Côte d'Ivoire. *In* : Regard jeune : Analyses politiques sur la Côte d'Ivoire. Friedrich E.S (Eds.), Abidjan (Côte d'Ivoire), pp. 4-12.
- Laborde J.-P. & Morel M. (1991). Aspects climatologiques liés aux possibilités d'alimentation en eau potable par collecte des eaux pluviales dans le Nord du Cameroun. *Hydrologie Continental*, 6(1) : 55-66.
- Lankoande G.D & Maradan D. (2013). Coût de l'inaction de la gestion des produits chimiques dans le secteur minier et agricole. Rapport final, Burkina-Faso, 48 p.
- Ligban R. (2013). Caractérisation hydrogéologique et origine des eaux de sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre-ouest ; côte d'ivoire). Thèse unique de Doctorat, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 121 p.
- Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A. & Vanclooster M. (2011). Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc. *Afrique SCIENCES*, 07(3) : 34-48.
- Mama V.J. & Oloukoi J. (2003). Evaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. *Téledétection*, 3(5) : 429-441.
- Maradan D., Ouédraogo B., Thiombiano N., Thiombiano T. & Zein K. (2011). Analyse économique du secteur des mines liens pauvreté et environnement. Rapport final du Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Projet Initiative Pauvreté Environnement, 69 p.
- Maréchal J.C., Dewandel B. & Subrahmanyam K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water resources Research*, 40 : 1-17.
- Maréchal J.C., Wyns R., Lachassagne P., Subrahmanyam K. & Touchard F. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Géosciences*, 335 : 451-460.

## REFERENCES

- Matini L., Moutou J.M. & Kongo-Mantono M.S. (2009). Évaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique SCIENCE*, 5(1) : 82-98.
- Miramond N., Miao D. & Brochard F. (2006). Diagnostic du phénomène Drainage Minier Acide sur des mines d'or primaire en Guyane françaises : Evaluation des risques associés. Rapport GEM Impact-DIREN, Guyane française, 116 p.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. & Williams J.R. (2005). Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation, version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, USA, 476 p.
- Orékan V.O.A. (2007). Implémentation du modèle CLUE-s aux transformations spatiales dans le centre Bénin aux moyens de données socio-économiques et de télédétection. Thèse de Doctorat, Université de Bonn (Bonn, Allemagne), 230 p.
- Othmani M.A. Souissi F., Silva E.F. & Coynel A. (2015). Geochemistry and potential environmental impact of the mine tailings at Rosh Pinah, southern Namibia. *Journal of African Earth Sciences*, 111 : 231-243.
- Savadogo A.N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute-Volta : étude régionale du bassin versant de Ima Sissili. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble (Grenoble, France), 350 p.
- Sawadogo E. (2011). L'impact de l'exploitation artisanale de l'or : cas du site de Fofora dans la province du Poni. Mémoire de Maîtrise en Science Humaine, Université de Ouagadougou, Burkina-Faso, 65 p.
- Soro G., Ahoussi K.E., Kouadio K.E., Soro T.D., Oulare S., Saley B.M., Soro N. & Biemi J. (2014). Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *Afrique SCIENCE*, 10(3) : 146-160.
- Taleb R.B., Naimi M., Chikhaoui M., Raclot D. & Sabir M. (2019). Évaluation des performances du modèle Agro-hydrologique SWAT à reproduire le fonctionnement hydrologique du bassin versant Nakhla (Rif Occidental, Maroc). *European Scientific Journal*, 15(5) : 311-333.

## REFERENCES

- Tia L., Ayenon S.F. & Koffi K. (2018). Impacts des exploitations aurifères industrielles sur le milieu naturel et les populations à Bonikro (Côte d'Ivoire). *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 2 : 61-73.
- Tiemoko G.J.L. (2016). Impact des exploitations minières artisanales sur la qualité des eaux de surface en Côte d'Ivoire : Cas des sites d'Agbaou, Hiré, Kokumbo et Angovia. Mémoire de Master en sciences et gestion de l'environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 60 p.
- Toney E., Akono A. & Ndi N.A. (1999). Le traitement par exemple des images de télédétection. Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, Yaoundé (Cameroun), 250 p.
- Wakpo M.J. (2020). Impacts des activités d'orpaillage clandestin sur l'environnement dans la Sous-Préfecture de Worofla (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire) à partir d'images de haute résolution. Mémoire de Master, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 62 p.
- Wiederkehr E. (2013). Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques : Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône. Thèse de doctorat, Université de Lyon (Lyon, France), 287 p.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yapi Y.H.A., Dongui B.K., Trokourey A., Barima Y.S.S., Essis Y. & Atheba. P. (2014). Évaluation de la pollution métallique des eaux souterraine et de surface dans un environnement minier aurifère à Hiré (Cote d'Ivoire). *International Journal of Biological and chemical Sciences*, 8(3) : 1281-1289.

# **ANNEXES**

**Annexe 1 : Dégradation visuelle de la qualité de l'eau**



**Annexe 2 : Usage du bois pour le soutènement des galeries minières**



### Annexe 3 : Risques de surdité par le bruit permanent du marteau



**Annexe 4 : Caractéristiques des scènes utilisées**

<b>Capteurs</b>	<b>Date d'acquisition</b>	<b>Résolution (m)</b>	<b>Identification</b>
<b>Landsat 7</b>	21-01-2008	30	Orbite : 197 / Rang : 55
<b>Landsat 7</b>	21-01-2008	30	Orbite : 197 / Rang : 56
<b>Landsat 7</b>	28-01-2008	30	Orbite : 198 / Rang : 54
<b>Landsat 7</b>	28-01-2008	30	Orbite : 198 / Rang : 55
<b>Landsat 7</b>	02-01-2013	30	Orbite : 197 / Rang : 55
<b>Landsat 7</b>	02-01-2013	30	Orbite : 197 / Rang : 56
<b>Landsat 7</b>	09-01-2013	30	Orbite : 198 / Rang : 54
<b>Landsat 7</b>	09-01-2013	30	Orbite : 198 / Rang : 55
<b>Sentinelle-2</b>	12-02-2019	10	T29NQG
<b>Sentinelle-2</b>	12-02-2019	10	T29NQH
<b>Sentinelle-2</b>	12-02-2019	10	T29NQJ
<b>Sentinelle-2</b>	12-02-2019	10	T29NRH

**Annexe 5 : Paramètres sensibles**

	Paramètres	Descriptions	Fichiers
1	CN2	Numéro de courbe du SCS	.Mgt
2	SOL_AWC	SOL_AWC Disponibilité en eau dans les couches de sol,	.Sol
3	ALPHA_BF	Coefficient de tarissement de la nappe souterraine,	.Gw
4	CH_N1	Coefficient de rugosité de Manning des chenaux secondaires,	.Sub
5	CH_K1	Conductivité hydraulique effective des chenaux secondaires	.Sub
6	CH_K2	Conductivité hydraulique effective des chenaux principaux	.Rte
7	GWQMN	Seuil de contribution de l'aquifère peu profond à l'écoulement en chenal (écoulement de base),	.Gw
8	CH_N2	Coefficient de rugosité de Manning des chenaux principaux	.Rte
9	ESCO	Facteur de compensation de l'évapotranspiration du sol	.Hru
10	GW_DELAY	Délai pour que l'eau souterraine qui transite par la nappe superficielle atteigne le cours d'eau	.Gw
11	RCHRG_DP	Coefficient de percolation de l'aquifère profond	.Gw
12	EPCO	Facteur de compensation de l'évapotranspiration pour le prélèvement des plantes	.Hru
13	NPERCO	Coefficient de percolation de l'azote	.Bsn
14	ERORGN	Taux d'enrichissement des sédiments en azote	.Hru

**Annexe 6 : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2008**

Classes	Forêt	Forêt dégradée	Eau	Habitat et sol nu	Culture et jachère	Total user	User's accuracy (%)
<b>Forêt</b>	26	4	0	0	0	30	86,67
<b>Forêt dégradée</b>	2	28	0	0	0	30	93,33
<b>Eau</b>	0	0	30	0	0	30	100
<b>Habitat et sol nu</b>	0	0	0	25	5	30	83,33
<b>Culture et jachère</b>	0	2	0	2	26	30	86,67
<b>Total producer</b>	28	34	30	27	31	150	–
<b>Producer's accuracy (%)</b>	92,86	82,35	100	92,59	83,87	–	–

Précision globale = 90 % ; Coefficient Kappa = 0,88

**Annexe 7 : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2013**

Classes	Forêt	Forêt dégradée	Eau	Habitat et sol nu	Culture et jachère	Total user	user's accuracy
<b>Forêt</b>	23	7	0	0	0	30	76,67
<b>Forêt dégradée</b>	1	28	0	0	1	30	93,33
<b>Eau</b>	0	0	30	0	0	30	100
<b>Habitat et sol nu</b>	0	0	0	29	1	30	96,67
<b>Culture et jachère</b>	0	1	0	1	28	30	93,33
<b>Total producer</b>	24	36	30	30	30	150	–
<b>Producer's accuracy</b>	95,83	77,78	100	96,67	93,33	–	–

Précision globale = 92 % ; Coefficient Kappa = 0,90

**Annexe 8 : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2019**

Classes	Forêt	Forêt dégradée	Eau	Habitat et sol nu	Culture et jachère	Total user	User's accuracy
Forêt	27	3	0	0	0	30	90
Forêt dégradée	1	29	0	0	0	30	96,67
Eau	0	0	30	0	0	30	100
Habitat et sol nu	0	0	0	28	2	30	93,33
Culture et jachère	0	1	0	0	29	30	96,67
Total producer	28	33	30	28	31	150	–
Producer's accuracy	96,43	87,88	100	100	93,55	–	–

Précision globale = 95,33 ; Coefficient Kappa = 0,94

**Annexe 9 : Taux de changement**

Classes	2008-2013		2013-2019		2008-2019	
	Tc	Tg	Tc	Tg	Tc	Tg
Habitat et sol nu	24,21	66,18	5,52	27,57	13,64	75,50
Forêt	-6,07	-36,74	3,12	16,85	-1,16	-13,70
Forêt dégradée	6,32	26,39	-6,55	-50,12	-0,90	-10,49
Culture et jachère	-10,63	-75,45	9,59	42,27	-0,12	-1,29
Eau	7,31	29,72	8,57	38,95	8,00	57,09

## **RESUME**

L'orpaillage clandestin, comme la plupart des activités humaines dans les bassins versants est source de pollution des hydrosystèmes. L'eau de la retenue de Issia, utilisée pour l'alimentation en eau potable, n'est pas épargnée à cette activité anthropique. Dès lors, l'objectif de cette étude a été d'évaluer l'incidence de l'orpaillage clandestin dans la zone aurifère de Tiebaya sur les flux d'eau entrant dans la retenue de Issia. La méthodologie mise en place a reposé sur l'analyse statique des paramètres physico-chimique de l'eau, la télédétection et la modélisation agro-hydrologique. La dynamique de l'occupation de sol a montré une tendance régressive des formations végétales au profit des formations anthropiques à l'horizon 2050. Parallèlement à la dynamique de l'occupation du sol, les performances de la modélisation avec SWAT ( $> 0,5$  à la fois pour la calibration et la validation) montre que les flux d'eau atteignant la retenue de Issia pourrait connaître une réduction d'ici 2050.

**Mots clés :** AEP, Issia, modélisation, orpaillage clandestin, télédétection.

## **ABSTRACT**

Clandestine gold panning, like most human activities in the catchment areas, is a source of pollution of the hydrosystems. The water of the Issia reservoir, used for drinking water supply, is not spared from this human activity. The objective of this study was therefore to assess the impact of illegal gold panning in the Tiebaya gold mining area on the water flows entering the Issia reservoir. The methodology used was based on static analysis of the physico-chemical parameters of the water, remote sensing and agro-hydrological modelling. The dynamics of land use showed a regressive trend of vegetation formations in favour of anthropogenic formations by 2050. In parallel to the land use dynamics, the performance of the SWAT modelling ( $> 0.5$  for both calibration and validation) shows that the water flows reaching the Issia reservoir could be reduced by 2050.

**Keywords:** AEP, Issia, Modeling, clandestine gold panning, remote sensing.