

Ministère de l'Éducation Nationale

République du Mali
Un Peuple-Un But-Une Fois

**UNIVERSITE DES SCIENCES JURIDIQUES ET POLITIQUES DE BAMAKO.
Institut de Pédagogie Universitaire (IPU).**



THESE

En vue de l'Obtention du Grade de Docteur en Science de l'Environnement.

THEME
**EVALUATION DES IMPACTS DE L'ORPAILLAGE SUR LA QUALITE ECOLOGIQUE
DES COURS D'EAU DANS LA REGION DE SIKASSO AU SUD DU MALI.**

Présenté par:

Ibrahim Werner TRAORE

Membres du Jury:

Directeur de thèse :	HOUHAMDI Moussa	Prof.	Université de Guelma (Algérie)
Rapporteur:	BARA Mouslim	M.C.	Université de Bouira (Algérie)
Rapporteur :	TOLOFOUDYE Adama	M.C.	FST (USTTB)
Examineur:	Bernard Sodio	Prof.	FST (USTTB)
Examineur:	KAREMBE Moussa	Prof.	FST (USTTB)

Année Universitaire 2017/2018.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon défunt père, le Médecin Colonel Major Alassane TRAORE qui a consenti tous les sacrifices pour mon éducation. Papa un jour tu m'as parlé en ces termes « Prof, je veux-tu faire la médecine ? pour être un grand Docteur comme moi un jour » et moi je t'ai répondu en disant «Papa je ne veux pas être médecin, mais je te promets de devenir un grand Docteur un jour comme toi mais dans un domaine que j'aurai choisi moi-même ». Aujourd'hui le tout puissant Allah m'offre l'opportunité de tenir cette promesse qui me tenait à cœur et je sais que tu es fier de ton fils de là où tu es. Dors en paix très cher père que les anges du paradis t'accompagnent, un fils qui n'oubliera jamais un père exceptionnel.

REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier ma mère en particulier qui a toujours cru en moi.

Je remercie ma femme de m'avoir toujours soutenu ainsi que pour ses précieux conseils;

Je remercie la République Démocratique d'Algérie et Populaire pour m'avoir donné l'opportunité d'étudier dans un si beau pays avec des gens extraordinaires.

Je remercie mon encadreur le Docteur Moussa Houhamdi Professeur à l'université 8 Mai 1945 de Guelma (Algérie) qui n'a hésité un seul instant à se lancer dans cette aventure avec moi, pour sa disponibilité sa fraternité indéfectible et sans faille.

Je remercie les honorables membres du jury.

Je remercie mon ami Boucherit Kheireddine dit Didine doctorant à l'université 8 Mai 1945 de Guelma pour son accompagnement et son hospitalité.

Je remercie le Lieutenant-Colonel Salif Diarra pour ses conseils;

Je remercie la compagnie minière Resolute-SOMISY d'avoir financé cette thèse de doctorat et je tiens particulièrement à remercier les personnes mentionnées en bas sans lesquelles cette thèse n'aurait jamais été possible, il s'agit de :

- *Rob Thiry (Safety and Training Manager /SOMISY);*
- *Richard Mc Elroy (Ex-Environment Surintendant /SOMISY);*
- *Andreas Okas (Mining Manager/SOMISY);*
- *Les Taylor (Ex-Operation Manager/SOMISY);*
- *Paul Kennedy (Plant Metallurgist/SOMISY)*
- *L'ensemble du département de l'environnement de la mine d'or de Syama (Monique Keita, Djibril Sanogo, Bakary Dembélé, Abdoulaye Diarra);*
- *Jackie Hartnett (Environment Consultant/SOMISY).*

RESUME

L'orpaillage ou encore l'exploitation minière artisanale est pratiqué au Mali depuis les temps anciens (Empires du Mali) et cela à l'aide de moyens rudimentaires mais ces dernières décennies, cette activité connaît une ascension fulgurante avec l'application de nouvelles techniques nécessitant l'utilisation de substances chimiques dangereuses (mercure, cyanure, acide, etc..) et des équipements mécaniques ou semi mécaniques (moto pompe, cracheur, détecteurs de métaux) pouvant engendrer des impacts considérables pour l'environnement.

Une évaluation des risques de l'orpaillage sur l'environnement biophysique (sol, eau, air, faune et flore) et Humain (santé, sécurité, économie) dans la région de Sikasso au sud du Mali nous indique plus d'impacts négatifs que positifs sur l'environnement, la santé et la sécurité des orpailleurs et des communautés locales. Cette évaluation des risques hiérarchise également les cours d'eau comme la composante environnementale la plus impactée négativement par les activités d'orpaillage.

Au cours de cette étude, 526 individus de macroinvertébrés benthiques ont été échantillonnés au sein de 4 cours d'eau (Bagoé, Wassoulou bale, Kobla babla et Bla) et se répartissent en 32 familles composées d'insectes (79%), de mollusque (11%), de crustacés (5%) et d'oligochètes (5%).

Le calcul des indices écologiques indique une richesse familiale (F) allant de 1 à 18 selon les cours d'eau pour l'ensemble, l'indice de Shannon (H') de [0 à 2], l'indice d'équitabilité de Pielou (J) de 0 à 0,91, l'indice biotique de famille d'Hilsenhoff (IBF) varie de 5,13 à 8, le Rapport EPT/C de 0 à 3 et l'indice biotique globale normalisée (IBGN) de 3 à 6.

L'analyse physico-chimiques des 4 cours d'eau indique des paramètres (CN⁻, Hg, Turbidité, Cd, Cr) au-dessus des normes de référence de la directive cadre de l'eau (DCE,2004).

Mots Clés : Orpaillage, Qualité écologique, Macroinvertébrés benthiques, Cours d'eau au Sud Mali.

ABSTRACT

Gold mining or artisanal mining has been practiced in Mali since ancient times (Empires of Mali) and this using rudimentary means but in recent decades, this activity knows a meteoric rise with new techniques requiring the use of dangerous chemical substances (mercury, cyanide, acid, etc.) and mechanical or semi mechanical equipment (motorcycle pump, crusher, metal detectors).

An evaluation of the risks of gold mining on the biophysical (soil, water, air, flora and fauna) and human (health, safety, economic) environment in the Sikasso region of southern Mali indicates more negative impacts positive on the environment, health and safety of gold miners and local communities. This risk assessment also ranks watercourses as the environmental component most negatively impacted by gold panning.

During this study, 526 macroinvertebrate benthic individuals were sampled in four water streams (Bagoé, Wassoulou bale, Kobla Babla and Bla) and divided into 32 families composed of 76% insects, 11% mollusks, 5% crustaceans, 5% oligochaetes.

The ecological index indicates a family wealth (F) ranging from 1 to 18 according to the rivers for the whole, the Shannon index (H') from 0 to 2, Pielou index (J) from 0 to 0.91, the Hilsenhoff family biotic index (IBF) from 5.13 to 8, the ratio EPT/C ratio from 0 to 3 and the standardized global biotic index (IBGN) from 3 to 6.

The physicochemical analysis of the four water streams indicates the following parameters (CN⁻, Hg, Turbidity, Cd, and Cr) above the framework directive on water (DCE, 2004).

Keywords: Gold panning, Ecological quality, benthic macroinvertebrates, Water stream, Southern Mali

LISTE DES ABREVIATIONS

- AEM:** Agence de l'Eau du Mali.
- ASEF:** Association Santé Environnement Français
- BM:** Banque Mondiale.
- CMM:** Chambre des Mines du Mali.
- CNRTL:** Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales.
- DCE :** Directive Cadre Européen sur L'eau.
- DIN:** Delta Intérieur du Niger.
- DNEF:** Direction Nationale des Eaux et Forêts.
- DNH:** Direction Nationale de l'Hydraulique.
- DNM:** Direction Nationale de la Météorologie.
- EIES:** Etude d'Impact Environnementale et Sociale.
- GMBEDQ :** Guide des Macroinvertébrés Benthiques d'Eaux Douce du Québec.
- IBGN:** Indice Biotique Globale Normalisée.
- IER:** Institut Economique et Rurale du Mali.
- IRSTEA:** Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture.
- INSTAT:** Institut National de la Statistique.
- ISO:** International Organization for Standardization.
- MAE:** Ministère des Affaires Etrangères.
- MDDEP:** Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MEA:** Ministère de l'Environnement et de l'Assainissement.
- MEDD:** Ministère de l'Environnement et du Développement Durable.
- MEME:** Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Eau.
- MMM:** Ministère des Mines du Mali.
- OIT:** Organisation internationale du travail.
- OQLF:** Office Québécois de la Langue Française.
- PIRT:** Projet Inventaire des Ressources Terrestres.
- PNUD:** Programme des Nations Unies pour le Développement.
- PNUE:** Programme des Nations Unies pour l'Environnement.
- SEQ-Eau:** Système d'Evaluation de la Qualité de l'Eau.
- UICN:** Union Internationale de Conservation de la Nature.
- U.S. EPA:** United States Environment Protection Agency.

GLOSAIRES

- **Environnement:**

C'est un ensemble perçu comme une entité ou un espace en un temps donné, des facteurs physiques, chimiques, biologiques et sociaux, susceptibles d'agir de façon directe ou non, immédiat ou à terme sur l'espèce humaine et ses activités et sur l'espèce animale et végétale (MEA, 2001).

- **Aspect environnemental:**

L'aspect environnemental peut être défini comme étant l'ensemble des éléments des activités, produits ou services d'un organisme susceptible d'interactions avec l'environnement. Un aspect environnemental est synonyme de facteur d'impact, les impacts résultent des aspects environnementaux (ISO 14001).

- **Impact environnemental:**

C'est l'ensemble des modifications négatives ou bénéfiques, résultant totalement ou partiellement de changements des aspects environnementaux d'un organisme (ISO 14001).

- **Evaluation environnementale:**

L'évaluation environnementale est une étude qui consiste à déterminer et à évaluer rationnellement les impacts qu'un projet peut avoir sur l'environnement ainsi qu'à recommander des moyens d'éviter ou de réduire ceux qui sont néfastes.

- **Exploitation minière artisanale (orpaillage):**

Toute opération qui consiste à extraire et concentrer des substances minérales (or) provenant des gîtes primaires et secondaires, affleurant ou subaffleurant, et en récupérer les produits marchands en utilisant des méthodes et procédés manuels et traditionnels (M.M, 2012).

- **Minerai:**

Un minerai est un gisement exploité par les orpailleurs. Il est de type alluvionnaire, éluvionnaire, et filoniens.

- **Placer:**

Un placer est un endroit où l'or a tendance à se concentrer.

- **Anthropisation:**

C'est la modification visible ou mesurable de toute activité humaine sur un écosystème terrestre ou aquatique (OQLF, 2012).

- **Benthos:**

C'est l'ensemble des espèces aquatiques qui vivent sur les fonds ou à proximité des cours d'eau et qui en dépendent pour leur nourriture (OQLF, 2012).

- **Biocénose:**

C'est la communauté d'espèces animales et végétales en équilibre dynamique plus ou moins stable dans un territoire défini (CNRTL, 2012).

- **Bioindicateurs:**

C'est un organisme ou ensemble d'organismes qui par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologique, éthologiques ou écologiques, permettent de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème ou d'un complexe et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées (Banaru et Perez, 2010).

- **Biosurveillance:**

C'est l'utilisation du vivant pour surveiller l'évolution des modifications, des altérations ou la stabilité de la qualité d'un milieu (IRSTEA, 2010).

- **Indice biotique:**

C'est l'évaluation quantitative de la qualité des écosystèmes sur la base de l'abondance relative aux espèces, de la présence et ou absence des espèces indicatrices (Casquet, 2012) ou en fonction de l'occurrence et de l'ampleur observées chez les bioindicateurs (Melquiot, 2008).

- **Intégrité écologique:**

L'intégrité écologique est l'état d'un écosystème dont la biodiversité et les processus naturels sont sains et intacts (OQLF, 2012).

- **Organisme polluo résistant ou polluotolérant:**

C'est un organisme pouvant vivre en eau polluée.

- **Organisme polluosensible:**

C'est un organisme exigeant en terme de qualité de l'eau, sa présence témoigne l'absence de pollutions majeures.

- **Paramètre physico-chimique:**

Un paramètre est un élément analysé au niveau de la composition de l'eau (présence et quantité). Pour chaque paramètre est déterminée une limite de qualité, fixant la quantité supérieure à ne pas dépasser.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Localisation des stations météorologiques dans la région de Sikasso.....	11
Tableau 2: Températures (T°C) moyennes mensuelles de la station de Sikasso.....	12
Tableau 3: Température (T°C) moyennes mensuelles de la station de Bougouni.....	12
Tableau 4: Pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Sikasso et Bougouni.....	13
Tableau 5: Bilan de l'eau par la méthode de Thornthwaite (Station de Sikasso).....	17
Tableau 6: Bilan de l'eau par la méthode de Thornthwaite (Station de Bougouni).	18
Tableau 7: Evapotranspiration réelle ETR par la méthode de Truc	19
Tableau 8: Bilan de ruissellements à la station de Sikasso et Bougouni.....	19
Tableau 9: Bilan d'infiltrations (Sikasso et Bougouni).....	19
Tableau 10: Estimation en pourcentage (%) du bilan hydrologique (Sikasso et Bougouni)...	19
Tableau 11: Localisation des stations hydrologiques.....	21
Tableau 12: Débit et hauteur moyen mensuel du Bagoé station de Pankourou (2002-2015). 21	21
Tableau 13: Débit et hauteur moyen mensuel du Baoulé Station de Bougouni (2002-2015). 21	21
Tableau 14: Evaluation de la qualité de l'eau d'Hilsenhoff (traduit en français).....	44
Tableau 15: Matrice descriptive.....	55
Tableau 16: Matrice de Martin Fecteau.....	56
Tableau 17: Cotation de l'importance des impacts.	56
Tableau 18: Critères d'évaluation des impacts.....	56
Tableau 19: Risques liés à la phase d'exploration des activités d'orpillage.....	72
Tableau 20: Risques liés à la phase d'installation des camps d'orpilleurs.	72
Tableau 21: Risques liés à la phase de fonçage des puits d'extraction.	74
Tableau 22: Risques liés aux opérations de dragage des cours d'eau.	75
Tableau 23: Risques liés aux traitements des minerais.	76
Tableau 24: Evaluation des risques identifiés par la matrice de Fecteau.	78
Tableau 25: Hiérarchisation des impacts évalués.....	81
Tableau 26: Richesse familiale des cours d'eau proches des sites d'orpillage artisanale.	85
Tableau 27: Fréquence d'occurrence des familles de macroinvertébrés de la rivière Bagoé..	86
Tableau 28: Indice de diversité (H') des cours d'eau en zone d'orpillage.	86
Tableau 29: Indice d'équitabilité (J) des cours d'eau en zone d'orpillage	87
Tableau 30: Rapport EPT/C des cours d'eau en zone d'orpillage.	88
Tableau 31: Indice biotique de famille (IBF) des cours d'eau en zone d'orpillage.....	89
Tableau 32: Richesse familiale du Bagoé en zone d'orpillage dans la région de Sikasso. ...	92
Tableau 33: Indice de diversité (H') du Bagoé en zone d'orpillage.....	92
Tableau 34: Indice d'équitabilité (J) du Bagoé en zone d'orpillage.....	93
Tableau 35: Indice biotique de famille (IBF) du Bagoé en zone d'orpillage.	94
Tableau 36: Liste des de macroinvertébrés de la rivière Bagoé, 2016.	100
Tableau 37: Liste des macroinvertébrés de la rivière Bagoé, 2017.....	101
Tableau 38: Liste des macroinvertébrés de la rivière Bagoé, 2018.....	102
Tableau 39: Liste des macroinvertébrés de la rivière Bagoé en zone de référence, 2018.....	103
Tableau 40: Liste des macroinvertébrés de la rivière Wassoulou balé, 2016.....	104
Tableau 41: Liste des macroinvertébrés de la rivière Kobla babla, 2016.....	104
Tableau 42: Liste des macroinvertébrés du ruisseau Bla, 2016.	105
Tableau 43: Méthodes d'analyse du laboratoire SGS Bamako.	xvii
Tableau 44: Détermination du groupe faunique (IBGN).....	xviii
Tableau 45: Détermination du groupe faunistique indicateur (IBGN).....	xviii
Tableau 46: Indices de Reference Biologique de la DCE, 2004.	xix

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation géographique du Mali (Source: MAE,2004).	6
Figure 2: Les principales zones climatiques du Mali (Source: IER, 2000).	7
Figure 3: Carte hydrographique du Mali modifiée (Traoré,2017).	9
Figure 4: Carte des couches aquifères du Mali (Source: CDI/DNH,2006).	10
Figure 5: Carte de localisation et division administrative de la régions de Sikasso	11
Figure 6 : Variation moyenne mensuelle de la température (Station de Sikasso).	12
Figure 7: Variation moyenne mensuelle de la température (Station de Bougouni).	13
Figure 8: Variation moyenne mensuelle de la pluviométrie à Sikasso et Bougouni	14
Figure 9: Variation interannuelle (2000-2015) de la pluviométrie à Sikasso et Bougouni	14
Figure 10: Coefficient pluviométrique annuelle de la station de Sikasso.	15
Figure 11: Bilan hydrologique mensuel (station de Sikasso, 2000-2015).	17
Figure 12: Bilan hydrologique mensuel (station de Bougouni, 2000-2015).	18
Figure 13: Les principaux cours d'eau de la région de Sikasso modifiée (Traoré, 2017).	20
Figure 14: Débit (Qi) moyen mensuel du Bagoé (2002-2015).	21
Figure 15: Débit (Qi) moyen mensuel du Baoulé (2002-2015).	22
Figure 16: Régions naturelles agro écologiques de la région de Sikasso (PIRT, 1983).	23
Figure 17: Gîte alluvionnaire et éluvionnaire.	27
Figure 18: Schéma du processus de récupération de l'or.	38
Figure 19: Matrice de calcul (IBGN).	46
Figure 20: Carte modifiée de la zone d'étude (Traoré, 2018).	53
Figure 21: Richesse familiale des cours d'eau proche dans la région de Sikasso.	85
Figure 22: Indice de Shannon Weaver (H') des cours d'eau dans la région de Sikasso.	87
Figure 23: Indice d'équitabilité (J) des cours d'eau en 2016.	88
Figure 24: Rapport EPT/C des cours d'eau en 2016.	88
Figure 25: Indice biotique de famille (IBF) des cours d'eau en 2016.	89
Figure 26: IBF du Bagoé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff	90
Figure 27: IBF du Wassoulou balé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff	90
Figure 28: IBF du Kobla babla par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff	91
Figure 29: IBF du Bagoé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff.	91
Figure 30: Richesse familiale du Bagoé en zone d'orpillage (2017, 2018).	92
Figure 31: Indice de diversité (H') du Bagoé en dans la région de Sikasso.	93
Figure 32: Indice d'équitabilité (J) du Bagoé en Zone d'orpillage.	93
Figure 33: Indice biotique de famille (IBF) du Bagoé (2017, 2018).	94
Figure 34: IBF du Bagoé en 2017 par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff.	94
Figure 35: IBF du Bagoé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff.	95
Figure 36: Richesse familiale (F) de la rivière Bagoé.	95
Figure 37: Indice de Shannon Weaver (H') de la rivière Bagoé.	96
Figure 38: Indice de Shannon Weaver (H') de la rivière Bagoé.	96
Figure 39: Indice de Simpson (Isim) de la rivière Bagoé.	97
Figure 40: Rapport ETP/C de la rivière Bagoé.	97
Figure 41: IBF des sites échantillonnés dans le Bagoé.	98
Figure 42: Indice biotique de famille (IBF) de la rivière Bagoé par rapport à Hilsenhoff.	98
Figure 43: IBGN des sites échantillonnés dans la rivière Bagoé.	99
Figure 44: IBGN du Bagoé par rapport aux indices d'aptitude de la DCE.	99
Figure 45: Oxygène dissous (OD) des cours d'eau dans la région de Sikasso.	106
Figure 46: Demande biologique en oxygène (DBO5) des cours d'eau, 2016.	107
Figure 47: Demande chimique en oxygène (DCO) des cours d'eau, 2016.	107
Figure 48: Taux de Nitrate (NO_3^-) des cours d'eau, 2016.	108

Figure 49: Taux de Nitrite (NO ₂ ⁻) des cours d'eau, 2016.....	108
Figure 50: Phosphore total (P) des cours d'eau, 2016.	109
Figure 51: Turbidité (Turb) des cours d'eau dans la région de Sikasso.	109
Figure 52: Température (T°C) des cours d'eau,2016.....	110
Figure 53: Potentiel d'hydrogène (pH) des cours d'eau,2016.	110
Figure 54: Concentration en cyanure (CN) des cours d'eau,2016.....	111
Figure 55: Concentration de mercure (Hg) des cours d'eau, 2016.	111
Figure 56: Concentration en cuivre (Cu) des cours d'eau, 2016.	112
Figure 57: Concentration en chrome (Cr) des cours d'eau, 2016.....	112
Figure 58: Oxygène dissous (OD) de la rivière Bagoé (2017-2018).	113
Figure 59: Demande biologique en oxygène (DBO ₅) de la rivière Bagoé (2017-2018).....	113
Figure 60: Taux de nitrate (NO ₃ ⁻) de la rivière Bagoé (2017-2018).....	114
Figure 61: Taux de Phosphore total (P) de la rivière Bagoé (2017-2018).....	114
Figure 62: Température (T°C) du Bagoé (2017-2018).	115
Figure 63: Turbidité (Turb) du Bagoé (2017-2018).	115
Figure 64: Potentiel d'hydrogène (pH) de la rivière Bagoé (2017-2018).....	116
Figure 65: Taux de cyanure (CN) de la rivière Bagoé (2017-2018).....	116
Figure 66: Concentration en mercure (Hg) de la rivière Bagoé (2017-2018).	117
Figure 67: OD de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	117
Figure 68: DBO ₅ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	118
Figure 69: DCO de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	118
Figure 70: Turb de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	119
Figure 71: NO ₃ ⁻ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	119
Figure 72: NO ₂ ⁻ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	120
Figure 73: Phosphore total (P) de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018. ..	120
Figure 74: pH de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	121
Figure 75: CN ⁻ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	121
Figure 76: Hg) de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.....	122
Figure 77: Cu de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	122
Figure 78: Cd de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.	123
Figure 79: ACC des cours d'eau dans la région de Sikasso en zone d'orpillage.....	124
Figure 80: Macroinvertébrés benthiques des cours d'eau en zone d'orpillage.	126
Figure 81: Intégrité biologique des cours d'eau en zone d'orpillage.....	127
Figure 82: Intégrité physico-chimique des cours d'eau en zone d'orpillage.	129
Figure 83: Intégrité biologique de la rivière Bagoé.....	130
Figure 84: Evolution de l'intégrité physico-chimique de la rivière Bagoé.....	131

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1: Recherche de l'or par le détecteur de métaux.	31
Illustration 2: Camp d'orpailleurs.	32
Illustration 3: Fonçage et extraction du minerai.	33
Illustration 4: Drague dans le lit de la rivière Bagoé.	33
Illustration 5: Traitement par batée du minerai au bord de la rivière.	34
Illustration 6: Concassage et test de la teneur du minerai en or (site de Kalako, 2016).	35
Illustration 7: Broyage au moulin du minerai en poudre fine.	35
Illustration 8: Lavage à l'écluse du minerai.	36
Illustration 9: Amalgamation à main nue du minerai.	37
Illustration 10: Pépité d'or mélangée au mercure (Hg).	37
Illustration 11: Combustion de l'amalgame.	37
Illustration 12: Naucoridae (photo personnelle).	xiii
Illustration 13: Libellulidae (photo personnelle).	xiii
Illustration 14: Gammaridae (photo personnelle).	xiii
Illustration 15: Hydrophilidae (photo personnelle).	xiv
Illustration 16: Pleidae (photo personnelle).	xiv
Illustration 17: Haliplidae (photo personnelle).	xiv
Illustration 18: Elmidae (photos personnelles).	xv
Illustration 19: Spheridae (photo personnelle).	xv
Illustration 20: Lymneidae (photo personnelle).	xv
Illustration 21: Notonectidae (photo personnelle).	xvi

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
GLOSAIRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ILLUSTRATIONS	xi
INTRODUCTION:	1
1. OBJECTIFS:	3
1.1. Objectif général :.....	3
1.2. Objectifs spécifiques :.....	3
2. METHODOLOGIE:	3
CHAPITRE I : DESCRIPTION GENERALE	5
1. PRESENTATION DU MALI:	6
1.1. Situation géographique:	6
1.2. Climat:.....	6
1.3. Végétation:.....	8
1.4. Faune:.....	8
1.5. Hydrographie:	9
1.6. Géologie:.....	9
2. REGION DE SIKASSO:	10
2.1. Climat:.....	11
2.1.1. Température:	11
2.1.2. Précipitation:	13
2.1.3. Evapotranspiration:	15
2.1.4. Estimation du ruissellement:	19
2.1.5. Estimation de l'infiltration:	19
2.2. Hydrographie:	20
2.2.1. Débit moyen mensuel:	20
2.3. Biodiversité:.....	22
3. EXPLOITATION MINIERE AU MALI:	23
3.1. Cadre législatif et réglementaire:	23
3.2. Conventions et accords internationaux sur l'environnement:	24

3.3.	Principales zones aurifères du Mali:	25
3.4.	Gisements aurifères au Mali:	26
3.4.2.	Dépôts éluvionnaires:.....	26
3.4.3.	Veines ou filons:	26
4.	MATERIEL ET METHODOLOGIES D’EXPLOITATION DES GISEMENTS	
	AURIFERES:	27
4.1.	Exploitation minière artisanale (Orpillage):.....	27
4.2.	Exploitation minière industrielle:.....	28
4.3.	Techniques de traitement des minerais d’or:	28
4.3.1.	Concentration gravitaire:	28
4.3.2.	Cyanuration:.....	29
4.3.3.	Amalgamation:.....	30
5.	ORPAILLAGE DANS LA REGION DE SIKASSO:	30
5.1.	Phase d’exploration:.....	31
5.2.	Phase d’installation:	31
5.3.	Phase d’extraction:	32
5.3.1.	Mine ou fonçage:	32
5.3.2.	Dragage:.....	33
5.4.	Phase de traitement et récupération de l’or:	33
5.4.1.	Minerai oxydé:	34
5.4.2.	Veine réfractaire:	34
5.4.3.	Récupération de l’or:.....	36
6.	QUALITE ECOLOGIQUE DES COURS D’EAU:.....	38
6.1.	Etat de connaissance sur les macroinvertébrés benthiques d’eau douce:.....	39
6.1.1.	Caractéristiques des macroinvertébrés benthiques:	39
6.1.2.	Macroinvertébrés benthiques d’eau douce d’Afrique:	39
6.1.3.	Bioindication de la qualité des cours d’eau:	43
	CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODOLOGIES.	49
1.	DESCRIPTION DE LA ZONE D’ETUDE:	50
1.1.	Site d’orpillage de Massiogocoro:.....	50
1.2.	Site d’orpillage de Massiogocoura:	50
1.3.	Site d’orpillage d’Alihamdoulilae:.....	51
1.4.	Site d’orpillage de Rourou:	51
1.5.	Site d’orpillage de Kalako:.....	51

1.6.	Site d’orpaillage de Farabacoura:	51
1.7.	Site d’orpaillage de Garalo:	51
1.8.	Site d’orpaillage de Niougoni:	52
2.	MATERIEL ET METHODOLOGIES:.....	54
2.1.	Evaluation des risques liés aux activités d’orpaillage:.....	54
2.1.1.	Identification des risques:	55
2.1.2.	Evaluation des risques:	55
2.1.3.	Hierarchisation des impacts:	57
2.2.	Evaluation de la qualité écologique des cours d’eau:	57
2.2.1.	Protocole d’échantillonnage des macroinvertébrés benthiques:	58
2.2.2.	Protocole d’échantillonnage de l’eau:	58
2.2.3.	Analyse des données:	59
	CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	71
1.	RESULTAT	72
1.1.	Evaluation des risques liés aux activités de l’orpaillage:.....	72
1.1.1.	Identification et analyse des risques:	72
1.1.2.	Evaluation des risques:	78
1.2.	Hierarchisation des impacts:	81
2.	DISCUSSIONS:.....	82
2.1.	Phase d’exploration:.....	82
2.2.	Phase d’installation:	82
2.3.	Phase d’extraction:	83
2.4.	Phase de traitement:	83
2.5.	Hierarchisation des risques:	84
2.6.	Conclusion:	84
3.	EVALUATION DE LA QUALITE ECOLOGIQUE DES COURS D’EAU:.....	84
3.1.	Intégrité biologique:.....	85
3.1.1.	Cours d’eau en zone d’orpaillage:	85
3.1.2.	Résultat année 2017 et 2018:	91
3.1.3.	Bagoé par rapport au site de référence de Niougoni :	95
3.2.	Intégrité physico-chimiques des cours d’eau:	106
3.2.1.	Cours d’eau en zone d’orpaillage:	106
3.2.2.	Bagoé en zone d’orpaillage:.....	113
3.2.3.	Bagoé en zone neutre (Niougoni):	117

3.3.	Analyse Canonique de Correspondance (ACC):.....	123
3.3.1.	Bagoé:	125
3.3.2.	Wassoulou balé:	125
3.3.3.	Kobla babla:	125
3.3.4.	Bla:.....	125
4.	DISCUSSIONS:.....	126
4.1.	Structure de la communauté de macroinvertébrés benthiques:.....	126
4.1.1.	Cours d'eau en zone d'orpillage (Année 2016):	126
4.1.2.	La rivière Bagoé en zone d'orpillage et neutre (Année 2017 et 2018):	129
5.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS:	132
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	134
	WEBOGRAPHIE	137
	ANNEXE :	xiii
	Annexe 1:	xiii
	Annexe 2:	xvii
	Annexe 3 :	xviii
	Annexe 4 :	xix

INTRODUCTION:

L'exploitation minière artisanale de l'or communément appelée orpaillage est une activité fortement pratiquée au Mali et cela depuis le temps des grands empires (Ghana, Mali, Songhaï). On se souvient encore de Kankou Moussa « Roi de l'or » qui, au cours de son pèlerinage à la Mecque en 1324 emporta avec lui entre 10 à 13 tonnes d'or faisant ainsi baisser le cours de l'or.

Le Mali, à l'instar de beaucoup d'autres pays d'Afrique du sahel, a connu une période de grande sécheresse dans les années 1970 évènement marquant la reprise des activités d'orpaillage. Au fil des années, le secteur minier est devenu le principal précurseur de l'économie du pays avec l'or comme premier produit d'exportation devant le coton et le bétail sur pied (**Claire Mainguy, 2011**).

Longtemps classé troisième producteur d'or du continent après l'Afrique du Sud et le Ghana, le Mali enregistre une production moyenne annuelle estimée à 50 tonnes d'or pour une valeur de 2,9 milliards de dollars américains au prix de septembre 2011 (**MMM, 2009**).

En plus de l'exploitation minière industrielle pratiquée par douze (12) mines d'or dont neuf (09) en cours de production, l'orpaillage aussi bien que se déroulant dans un cadre informel contribue à la production aurifère avec une moyenne annuelle estimée à quatre (04) tonnes, un chiffre pouvant être plus élevé (**MMM, 2009**) et emploie environs 100.000 à 200.000 personnes (**Rani et al., 2006**).

L'orpaillage autrefois était pratiqué de façon purement traditionnelle à l'aide de moyens rudimentaires (pèle, pioche, lavage à la batée), s'est fortement modernisé dans ces dernières décennies avec l'utilisation de nouveaux équipements mécaniques industriels et artisanaux (broyeur, cracheur, motopompe, drague, détecteur de métaux etc..) ainsi que de nouvelles techniques de récupération de l'or, impliquant l'utilisation de substances chimiques très dangereuses telles, le mercure et la cyanure (**Rani Parker & Fred Wood, 2006**).

Bien que l'orpaillage impacte positivement sur l'économie nationale et crée de l'emploi, cependant force est de reconnaître que les nouvelles techniques employées peuvent engendrer des impacts négatifs sur l'environnement et particulièrement sur la qualité des cours d'eau, la santé et la sécurité des orpailleurs et celle de la communauté locale.

La perturbation des milieux aquatiques résultant des activités humaines, entraîne un changement de conditions et des processus biologiques qui se répercutent grandement sur leur intégrité écologique (**Karr et al., 1986 ; Davies et al., 2006**).

La qualité d'une eau est un facteur influent de l'état de santé et la mortalité de l'humain et celle des animaux (**Kazi et al., 2009**).

Malgré la présence d'importants réseaux hydrographiques, l'eau devient de plus en plus une ressource rare au Mali et cela est dû, non seulement aux aléas climatiques mais aussi aux activités d'origines anthropiques (**PNUD-PNUE, 2008**). Actuellement au Mali, seulement 41% de la population rurale ont accès à l'eau potable contre 81% en milieu urbain.

Les 80% des pathologies sont des maladies hydriques contractées par ingestion (cholera, diarrhée) ou par contact (schistosomiase) ainsi que d'autres maladies dont l'eau constitue le principal facteur de développement tel que le paludisme et l'onchocercose (**MEME, 2017**).

La région de Sikasso, située dans l'extrême Sud du Mali est la plus arrosée de tout le pays, elle draine à elle seule 80% des ressources en eau pérennes (**MEME, 2017**) du pays. En plus de son important réseau hydrographique, la région possède également un sous-sol très riche en ressource minière particulièrement en or (alluvionnaires, éluvionnaires et filoniens) le classant parmi les trois (03) principales régions minières du pays en plus de la région de Kayes et de Koulikoro.

Outre l'exploitation minière industrielle, l'orpaillage est en pleine expansion dans la région avec plus de 120 sites (**CMM, 2017**) dont la majorité se situe le long des principaux cours d'eau ou de leurs affluents : La rivière Bagoé, le Baoulé, le Wassoulou Balé, et le Sankarani. La présence de ces sites d'orpaillage sur le long de ces cours d'eau, entraîne une dégradation progressive de la qualité de ces derniers.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, en vue d'évaluer les impacts de l'orpaillage sur la qualité écologique des cours d'eau dans la région de Sikasso par une quantification et qualification de la communauté des macroinvertébrés benthiques (bioindicateurs de qualité des cours d'eau), ainsi que les paramètres physico-chimiques des eaux qui conditionnent la vie des organismes vivants et assurent un certain équilibre naturel entre les différents compartiments biotiques mis en place (**Hadi, 2017**).

Jusqu'où cette activité d'orpaillage impact la qualité écologique des cours d'eau dans la région de Sikasso ?

1. OBJECTIFS:

1.1. Objectif général :

L'objectif général de cette étude est d'évaluer les impacts de l'orpaillage sur l'environnement physique et Humain.

1.2. Objectifs spécifiques :

De façon spécifique l'objectif de cette étude de thèse est d'évaluer l'intégrité écologique des cours d'eau dans la région de Sikasso. Pour ce faire, nous allons :

- Identifier, évaluer et hiérarchiser les risques liés à l'orpaillage ;
- Réaliser un premier inventaire des macroinvertébrés benthiques en zone d'orpaillage;
- Evaluer la qualité biologique et physico-chimique des cours d'eau ;

2. METHODOLOGIE:

Afin d'atteindre nos objectifs, cette étude se déroulera en trois (03) principales étapes sur une période de trois (03) ans :

Etape 1:

La première étape portera sur la revue documentaire et la planification des outils de collecte des données. Il nous faut:

- Analyser les travaux de recherche déjà réalisés sur notre problématique (mémoires, thèses, études scientifiques, articles, recherches sur internet) ;
- Effectuer des entretiens et interviews avec les structures, personnes physiques et morales pouvant fournir des informations par rapport à notre thème de recherche (autorités compétentes, université, bureaux d'études, associations, chercheurs, orpailleurs) ;

Etape 2:

La deuxième étape sera consacrée aux visites et enquêtes sur terrain par rapport aux activités d'orpaillage, dont le choix des sites d'orpaillage prendra en compte certains critères qui sont :

- La localisation du site en amont des mines industrielles ;
- La facilité des conditions d'accès aux sites ;
- La situation sécuritaire au niveau site ;
- La proximité du site par rapport à un cours d'eau.

Nous allons également procéder à des échantillonnages de macroinvertébrés benthiques et d'eaux afin de les caractériser aux laboratoires.

Etape 3:

Cette troisième et dernière étape portera sur la rédaction d'un rapport finale et qui sera reparti en trois (03) chapitres qui sont les suivants :

- Chapitre I : Description générale;
- Chapitre II: Matériels et méthodologie ;
- Chapitre III: Résultats et discussions.

CHAPITRE I : DESCRIPTION GENERALE
(42 Pages/ 6 - 48.p).

1. PRESENTATION DU MALI:

1.1. Situation géographique:

Le Mali est un pays enclavé d'Afrique de l'Ouest entre les latitudes 10°31'Est; 25°10' Nord et les longitudes 12°20'Ouest ; 04°21'Est et couvre une superficie de 1 241 238 km². Le pays partage 7 420 km de frontières avec sept (07) pays limitrophes à savoir l'Algérie au Nord, le Niger et le Burkina Faso à l'Est, la Côte d'Ivoire, la Guinée au Sud, la Mauritanie, et le Sénégal à l'Ouest.

Le Mali compte 14 528 662 habitants (INSTAT, 2012) et est divisé en dix (10) régions et un district : Tombouctou, Kidal, Gao, Sikasso, Ségou, Mopti, Koulikoro, Kayes, Taoudéni, Ménaka et le district de Bamako.



Figure 1: Situation géographique du Mali (Source: MAE,2004).

1.2. Climat:

Le régime climatique du Mali est dominé par une alternance entre une saison sèche, caractérisée par des vents chauds et secs venant du Sahara (harmattan) du Sud au Nord de Décembre à Mai et une saison pluvieuse caractérisée par des vents humides venant du Golfe de Guinée (la mousson) de Juin à Novembre.

Le régime pluviométrique est de type intertropical continental et est caractérisé par une décroissance régulière des précipitations du Sud vers le Nord.

La pluviométrie varie fortement dans l'espace et le temps en fonction des zones climatiques. On distingue quatre (04) principales zones climatiques au Mali qui sont:

- **La zone soudano-guinéenne :** Caractérisée par un climat de type guinéen, les précipitations moyennes annuelles sont supérieures à 1000 mm par an.
- **La zone soudanienne :** Caractérisée par un climat tropical avec des précipitations moyennes annuelles variant entre 600 et 1000 mm
- **La zone sahélienne :** Caractérisée par un climat de type sahélien, avec des précipitations moyennes annuelles comprises entre 200 et 600 mm
- **La zone saharienne :** Caractérisée par un climat désertique et la pluviométrie varie de 200 mm à moins de 50 mm par an.

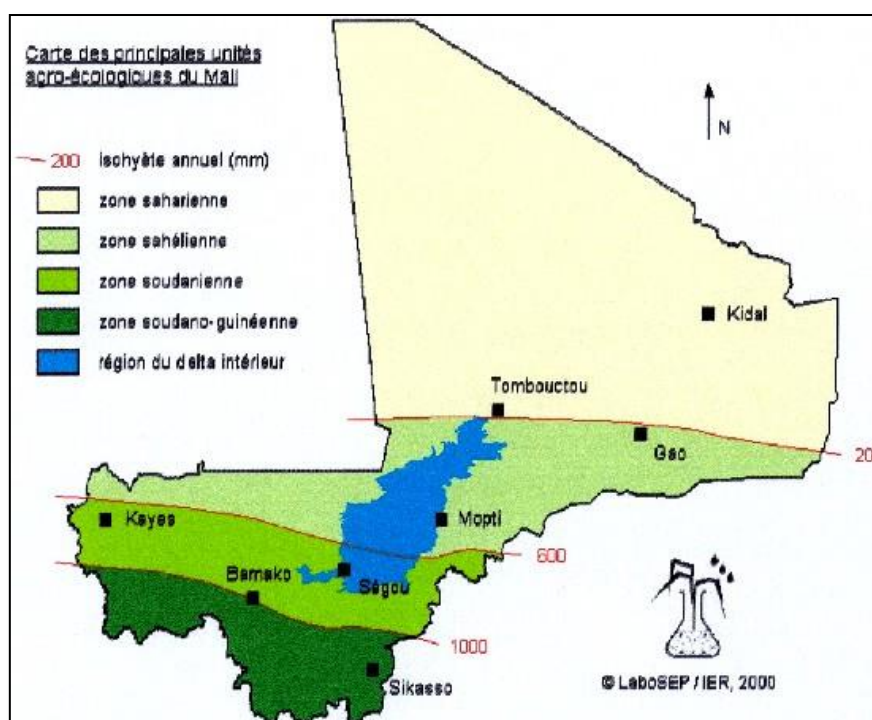


Figure 2: Les principales zones climatiques du Mali (Source: IER, 2000).

Au Mali, les températures moyennes annuelles varient du Sud-Ouest au Nord-Est entre 26°C et 29 °C. Si du Nord-Est, les températures maximales dépassent les 45°C, les minimales peuvent descendre en dessous des 10°C. Le régime de température fait que l'évaporation et l'évapotranspiration augmentent du Sud au Nord.

L'humidité relative en moyenne annuelle est inférieure 50% dans la zone saharienne, sahélienne au Nord et supérieure à 50% valeur dans la zone soudanienne au Sud. L'humidité relative est minimale de Février à Mars et maximale de Juin à Octobre.

1.3. Végétation:

On distingue cinq (05) différents types de formations végétales réparties entre les 4 zones bioclimatiques:

- Les formations ligneuses insignifiantes voire nulles dans la zone bioclimatique du Sahara, appartenant aux écosystèmes désertiques.
- Les steppes herbeuses parsemées d'épineux à faible production ligneuse dans la zone bioclimatique du Sahel correspondant à un écosystème semi désertiques.
- Les savanes arbustives, arborées, boisées et des galeries forestières dans la zone bioclimatique soudanienne.
- Des écosystèmes forestiers avec des savanes boisées dans la zone bioclimatique guinéenne.
- Le Delta Intérieur du Niger (DIN) appartenant aux écosystèmes aquatiques d'eau douce et classé site Ramsar, la végétation se compose de prairies herbeuses ponctuées d'arbres et de petits massifs ligneux.

1.4. Faune:

La faune est caractérisée par une diversité d'espèces, avec un nombre réduit d'individus. Les mammifères sont représentés par 136 espèces (UICN,1989) dont certaines sont en voie d'extinction : l'élan (*Taurotragus derbianus*), la girafe (*Giraffa camelopardalis*) *Gazalla*, l'Addax (*Addax nasomaculatus*), le mouflon à manchettes (*Ammotragus lervia*), l'hippopotame nain (*Hexaprotodon liberiensis*), le guépard (*Acinonyx jubatus*), le lycaon (*Lycaon pictus*), le lamantin (*Trichechus senegalensis*), le pangolin (*Minis spp*) l'oryctérope (*Orycteropus afer*), le lion (*Panthera leo*), l'éléphant (*Loxodonta africana*), le chimpanzé (*Pan troglodytes*), le chacal (*Canis aureus*) l'hyène tachetée (*Crocuta crocuta*), le guib (*Tragelaphus scriptus*).

On note également la présence de plus de 640 espèces d'oiseaux dont nombreux sont des migrateurs qui viennent séjourner dans le DIN et 143 espèces de poissons ont été inventoriées dans le fleuve Niger (Daget ,1954).

1.5. Hydrographie:

Le Mali est arrosé par deux (02) grands cours d'eau qui sont : le fleuve Niger et le fleuve Sénégal.

- Le fleuve Niger est long de 4200 km dont 1780 km au Mali. Il prend sa source dans le Fouta-Djalon en Guinée et rejoint l'océan atlantique au Nigeria. Ses deux principaux affluents sont le Sankarani et le Bani.
- Le fleuve Sénégal, long de 1800 km avec environ la moitié de ses cours au Mali est formé par la réunion du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé. Ses principaux affluents maliens sont le Baoulé affluent du Bakoye et la Falémé.

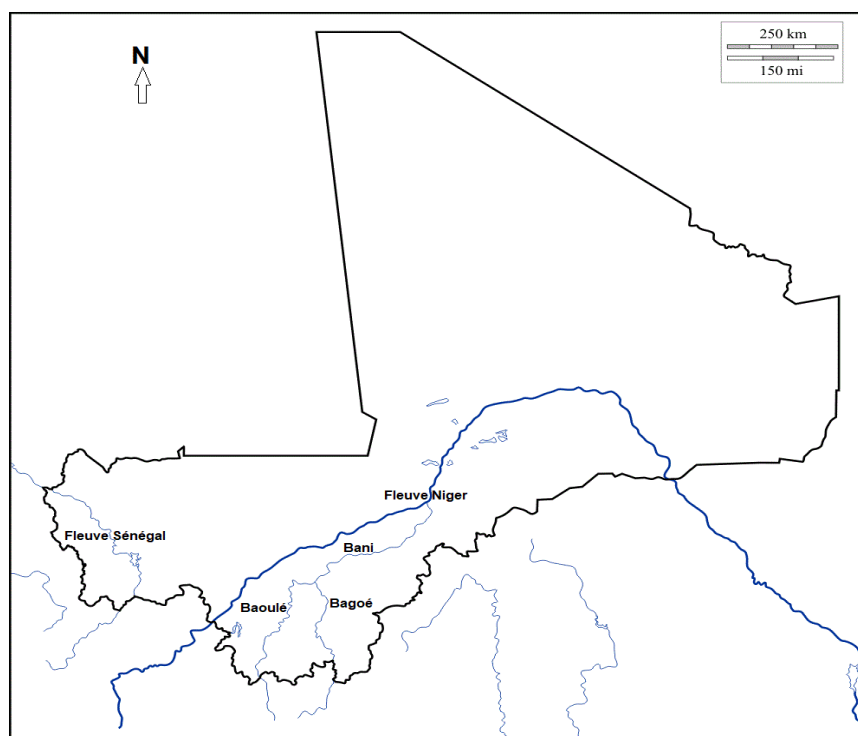


Figure 3: Carte hydrographique du Mali modifiée (Traoré,2017).

1.6. Géologie:

Le Mali occupe la majeure partie du vaste bassin sédimentaire de Taoudéni qui représente une des structures majeures de la géologie de l'Afrique de l'ouest.

Du point de vue lithostratigraphique, on distingue neuf (09) grandes subdivisions géologiques au Mali qui sont :

- Le socle Birimien ;
- L'infra-cambrien;
- Le cambrien;
- Le primaire de Taoudéni ;

- Les intrusions doleritiques ;
- Le continental intercalaire ;
- Le crétacé supérieur /éocène inférieur ;
- Le continental terminal ;
- Les formations de recouvrement.

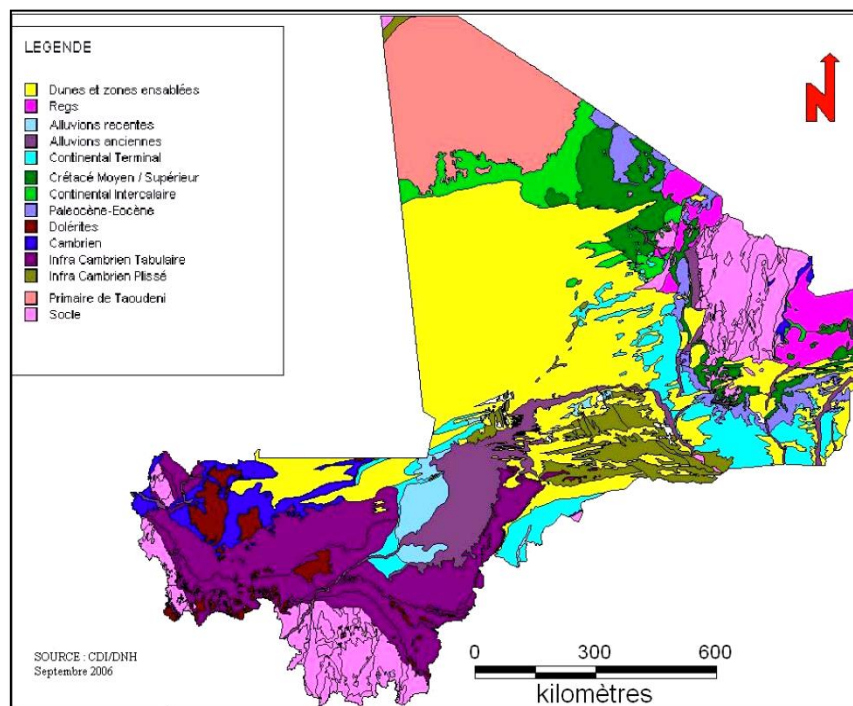


Figure 4: Carte des couches aquifères du Mali (Source: CDI/DNH,2006).

2. REGION DE SIKASSO:

La région de Sikasso est située dans l'extrême Sud du Mali entre 11°5' latitude Nord et le 5°30' longitude Ouest et couvre une superficie de 71.790 km² pour une population de 2 625 919 habitants (INSTAT, 2012). Elle est limitée au Nord-Ouest par la région de Koulikoro, au Nord-Est par la région de Ségou, à l'Est par le Burkina Faso, au Sud par la Côte d'Ivoire et à l'Ouest par la Guinée.

La région de Sikasso compte sept (07) cercles (Bougouni, Kadiolo, Kolondiéba, Koutiala, Sikasso, Yanfolila, et Yorosso), 147 communes (3 urbaines et 144 rurales) et 1831 villages.

La population est composée essentiellement de Senoufo (Sikasso), Miniankas (Koutiala), Peuls (Wassoulou et Ganadougou) et de Samoghos (Kadiolo).

Cependant à cause de ses conditions agricoles favorables, la région reçoit aujourd'hui de nombreuses autres ethnies en provenance d'autres régions du pays (Dogon, Songhaï, ...etc.). L'économie locale est principalement basée sur l'agriculture, l'élevage et l'industrie.

La région Sikasso possède un sous-sol très riche en minerais (lithium, or, aluminium, nickel et diamant) et actuellement on compte quatre (04) mines en production (Morila, Kalana, Syama, Wassoulor) et une nouvelle mine en construction à Nampala. En plus des mines industrielles, l'exploitation minière artisanale (Orpaillage) est aussi fortement pratiquée dans la région.



Figure 5: Carte de localisation et division administrative de la régions de Sikasso (Source :DAT Sikasso,2009).

2.1. **Climat:**

En vue de caractériser le régime climatique de la région de Sikasso, nous avons analysé des données recueillies par la station météorologique de Sikasso, la station météorologique de Bougouni et la station de la mine d'or de Syama.

Tableau 1: Localisation des stations météorologiques dans la région de Sikasso.

Station	Coordonnées géographiques		Paramètres mesurés	Période d'observation
	latitude	longitude		
Sikasso	11°19 Nord	005°41 Ouest	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Précipitation 	2000-2015
Bougouni	11°25Nord	007°30 Ouest	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Précipitation 	2000-2015

2.1.1. **Température:**

La température généralement s'exprime en degré Celsius (°C). Elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne la répartition des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère.

Tableau 2: Températures (T°C) moyennes mensuelles de la station de Sikasso (DNM, 200-2015).

Paramètre	Jan	Fév.	Mar	Avr.	May	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
T°C moyenne	24.9	28	31.6	32.1	30.7	28.4	26.5	26.2	26.6	28.5	27.8	25.6

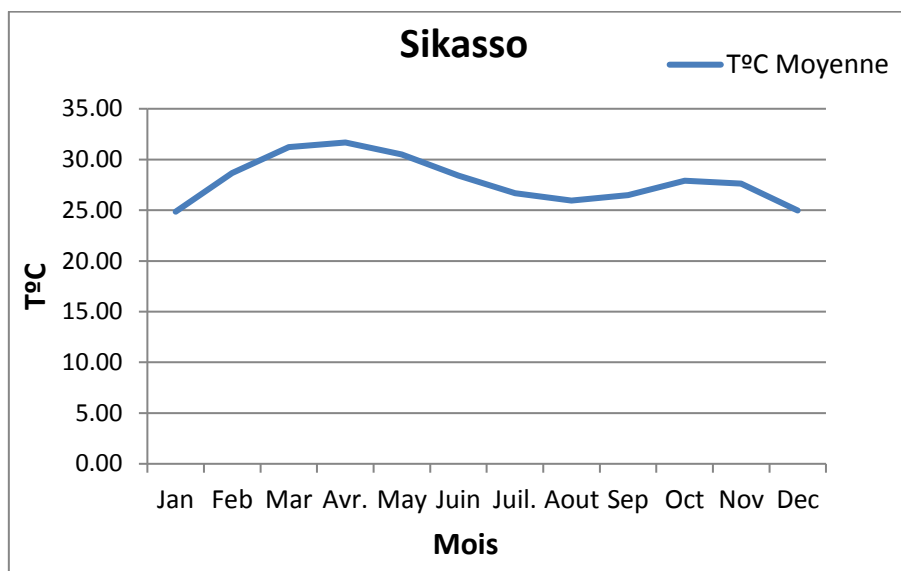


Figure 6 : Variation moyenne mensuelle de la température (Station de Sikasso).

L'analyse des données à l'échelle mensuelles de la station de Sikasso (2007 à 2016) nous montre une température moyenne maximale de 32.1°C au mois d'Avril, et une moyenne minimale de 24.9°C au mois de Janvier.

Tableau 3: Température (T°C) moyennes mensuelles de la station de Bougouni (DNM,2007-2016).

Paramètre	Jan	Fév.	Mar	Avr.	May	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
T°C moyenne	25.4	28.7	31.5	32.3	30.9	28.7	26.8	26.4	26.8	28.1	27.7	25.5

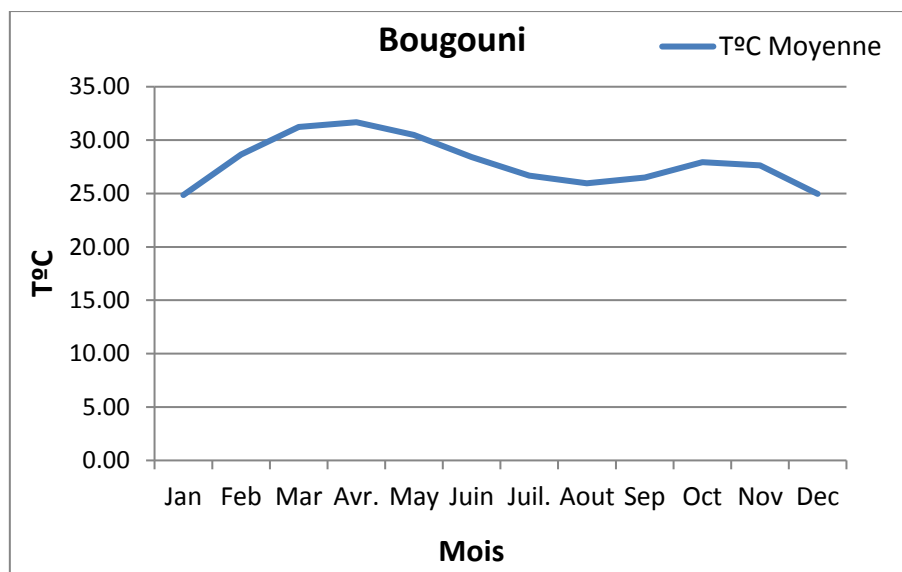


Figure 7: Variation moyenne mensuelle de la température (Station de Bougouni).

L'analyse des données de la station de Bougouni (2007-2016) nous résume une température moyenne -mensuelle maximale de 32.3°C au mois d'Avril, et une moyenne mensuelle minimale de 25.4°C en Janvier.

2.1.2. Précipitation:

Les précipitations peuvent être définies comme tous les météores qui tombent dans une atmosphère, elles peuvent être sous forme solide (neige) comme sous forme liquide (pluie) et s'expriment en millimètre (mm). La répartition mensuelle des précipitations au cours de l'année influe aussi sur le régime des écoulements et les apports des nappes.

Par rapport à notre zone d'étude, nous avons analysé les variations pluviométriques moyennes mensuelles et annuelles des données recueillies par la station météorologique du cercle de Sikasso et celle de Bougouni sur une période de quinze (15) ans (2000 à 2015).

Tableau 4: Pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Sikasso et Bougouni.

Station	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Sikasso	3.75	3.58	9.66	56.21	84.16	156.67	222.29	310.08	219.66	95.11	6.77	0
Bougouni	1.82	0.95	5.86	39.08	86.52	172.21	259.65	279.41	216.87	79.05	5.2	0

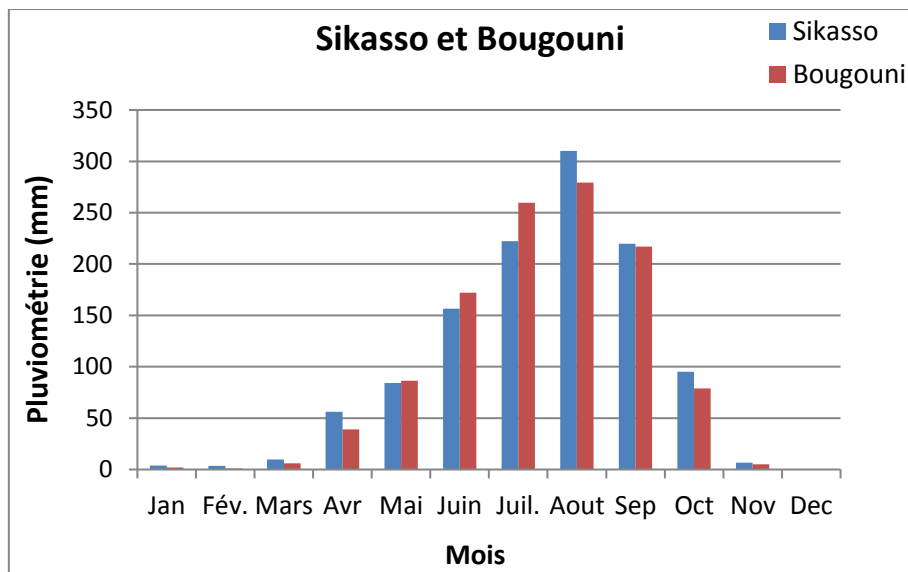


Figure 8: Variation moyenne mensuelle de la pluviométrie à Sikasso et Bougouni (Source : DNM).

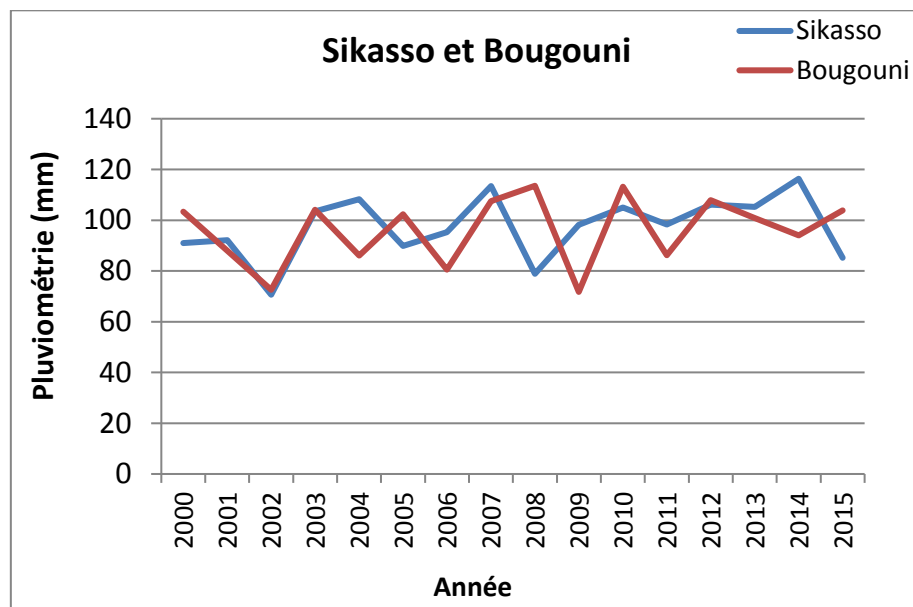


Figure 9: Variation interannuelle (2000-2015) de la pluviométrie à Sikasso et Bougouni (Source : DNM).

L'analyse des histogrammes de la variation moyenne mensuelle de la pluviométrie des deux stations (Sikasso et Bougouni), nous indique clairement que la pluviométrie atteint un maximum au mois d'Aout et un minimum au mois de Décembre. On remarque également une réduction de la quantité de pluie de Sikasso à Bougouni.

L'analyse des variations interannuelles durant les 15 ans (200-2015) nous montre que l'année 2014 a enregistré la plus grande quantité de pluie avec moyenne de 116.33 mm et l'année 2003 a connu la pluviométrie la plus basse avec une moyenne de 70,65 mm.

- Le coefficient de variation représente le rapport de l'écart type sur la moyenne des précipitations enregistrées et mesure la dispersion relative d'une série.

$$Cv = \frac{\sigma_x}{\bar{X}}$$

Cv = Coefficient de variation

σ_x = Ecart type de la série

\bar{X} = Pluviométrie moyenne pour une période de n années.

- Le coefficient pluviométrique présente le rapport de la pluviométrie d'une année sur la pluviométrie moyenne annuelle d'une période donnée. Plus le coefficient est grand ($H > 1$) plus l'année correspondante est dite excédentaire (Maoui, 2007). Mathématiquement, il se traduit par l'équation:

$$H = \frac{H_i}{\bar{H}}$$

H = Coefficient Pluviométrique

H_i = Pluviométrie de l'année donnée

\bar{H} = La pluviométrie moyenne annuelle de n années

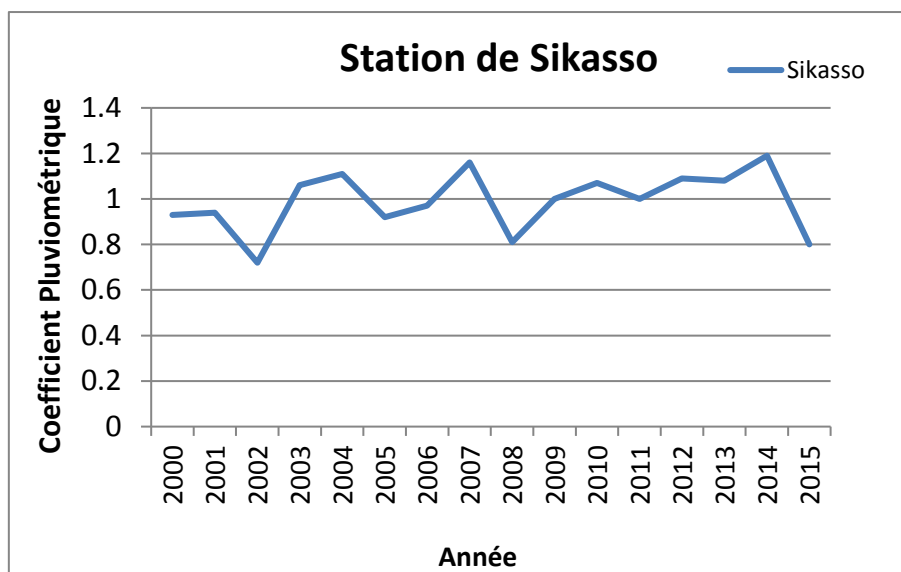


Figure 10: Coefficient pluviométrique annuelle de la station de Sikasso.

Le coefficient pluviométrique de la station de Sikasso représenté sur la figure 10 montre que les 2003, 2004, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 furent des années excédentaires par contre les années 2000, 2001, 2002, 2005, 2006, 2008, 2015 ont été déficitaires en pluie avec des coefficients $H < 1$.

2.1.3. Evapotranspiration:

L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation directe qui s'effectue à partir du sol plus l'évaporation issue de la transpiration des végétaux.

L'évapotranspiration joue un rôle très important dans le cycle hydrologique, on distingue deux (02) types d'évapotranspiration qui sont :

- L'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur ;
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est la quantité d'eau susceptible d'être perdue dans les mêmes conditions quand elle est facteur limitant (**Bouchet, 1963**).

L'application de la formule empirique de Turc permet de déterminer l'évapotranspiration.

2.1.3.1. Méthode de Thornthwaite:

Le calcul du bilan hydrique estimé par l'écoulement et l'évaporation sur un pas de temps décadaire ou mensuelle en fonction du sol et de la météorologie.

Avec la méthode de Thornthwaite, nous avons estimé l'évapotranspiration (ETP) ainsi que l'évapotranspiration réelle (ETR) pour la station météorologique de Sikasso et celle de Bougouni durant la période 2000-2015.

La méthode de Thornthwaite est basée sur l'estimation des réserves d'eau utiles (RU) autrement dit la réserve utilisée par les végétaux pour leur développement et pouvant ainsi être évapotranspirée par les stomates. Elle est mesurée en millimètre (mm) d'eau.

Selon Thornthwaite, un sol est saturé lorsqu'il absorbe une lame d'eau équivalente à 100 mm.

$$ETP \text{ (mm)} = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a K$$

ETP = Evapotranspiration potentielle mensuelle.

T= Température moyenne mensuelle (°C).

I = Indice thermique annuel. $I = \sum_{m=1}^{12} i(m), i(m) = \left[\frac{T}{5} \right]^{1.514}$

a= Coefficient calculé par la formule ; $a = 1,6 (I/100) + 0,5$

K =Coefficient d'ajustement.

Ainsi pour déterminer l'évapotranspiration réelle **ETR**, les conditions suivantes s'imposent :

- Si pour un mois, la pluviométrie moyenne **P** est supérieure ou égale à l'évapotranspiration potentielle **ETP**, ce qui implique qu'ETP est égale à l'évapotranspiration réelle **ETR**. Dans ce cas la quantité restante (**P- ETR**) va alimenter la réserve facilement utilisable (RU) jusqu'à un maximum de 100 mm (Seuil de saturation selon Thornthwaite) et l'excédent en eau sera soit infiltrée (**I**) vers la nappe phréatique soit ruisselée (**R**).

$$P \text{ (mm)} \geq ETP \Rightarrow ETP = ETR.$$

- Si, pour un mois, la pluviométrie **P (mm)** est inférieure à l'évapotranspiration potentielle **ETP** ce qui implique que la valeur de l'évapotranspiration réelle **ETR = P + RU**.

$$P \text{ (mm)} < ETP \Rightarrow ETR = P + RU.$$

- Si la réserve utile **RU** est nulle ce qui implique un déficit agricole (Da) et dans ce cas **ETR** ne pourra affecter que la quantité d'eau.

$$Da = ETP - ETR.$$

Tableau 5:Bilan de l'eau par la méthode de Thornthwaite (Station de Sikasso).

Jan : Janvier ; **Fév. :** Février ; **Avr. :** Avril ; **Juil. :** Juillet ; **Sept :** Septembre ; **Oct. :** Octobre ; **Nov. :** Novembre ; **Déc. :** Décembre.

Paramètres	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	3.75	3.58	9.66	56.21	84.16	156.67	222.29	310.08	219.7	95.11	6.77	0
T°C	25.16	28.38	31.08	31.58	30.3	28.11	26.5	25.96	26.4	27.9	27.48	25.21
ETP (mm)	31.2	37.45	42.97	44.02	41.35	36.91	33.75	32.72	33.56	36.49	35.66	31.3
RU (mm)	0	0	0	12.19	55	100	100	100	100	100	0	0
ETR (mm)	3.75	3.58	9.66	44.02	41.35	36.91	33.75	32.72	33.56	36.49	0	0
Déficits (mm)	27.45	33.87	33.31	0	0	0	0	0	0	0	35.66	31.3
Excédents (mm)	0	0	0	12.19	42.81	119.76	188.54	277.36	186.1	58.62	0	0

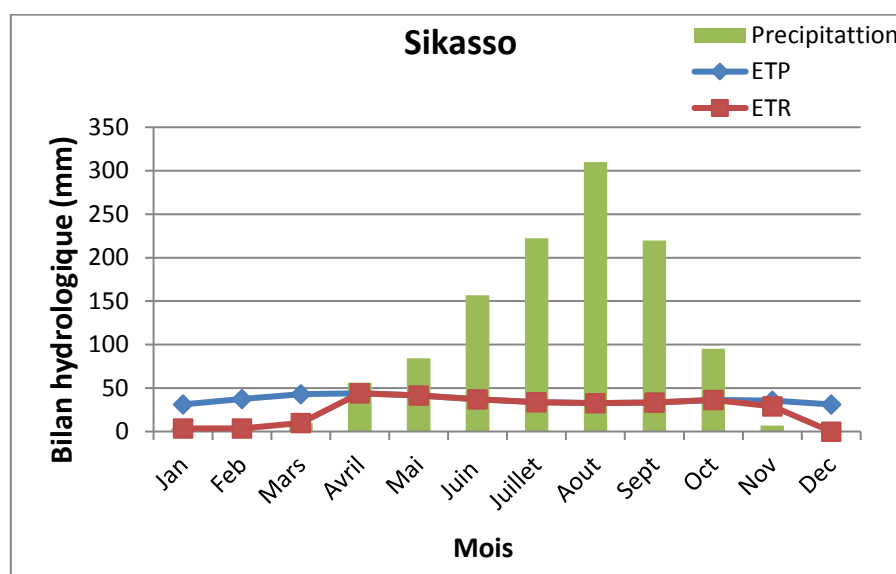


Figure 11:Bilan hydrologique mensuel (station de Sikasso, 2000-2015).

Tableau 6: Bilan de l'eau par la méthode de Thornthwaite (Station de Bougouni).
Jan : Janvier ; **Fév. :** Février ; **Avr. :** Avril ; **Juil. :** Juillet ; **Sept :** Septembre ; **Oct :** Octobre ;
Nov : Novembre ; **Déc. :** Décembre

Paramètres	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	1.82	0.95	5.86	39.08	86.52	172.21	259.65	279.41	216.9	79.05	5.2	0
T°C	25.61	28.66	31.37	32.28	31	28.61	27.02	26.5	26.92	28.03	27.45	25.42
ETP (mm)	31.01	36.78	42.17	44.03	36.68	33.66	32.66	33.45	35.56	34.45	30.67	0
RU (mm)	0	0	0	0	49.84	100	100	100	100	1001	0	0
ETR (mm)	1.82	0.95	5.86	39.08	36.68	33.64	32.66	33.45	35.56	34.45	5.2	0
Déficits (mm)	29.19	35.83	36.31	4.95	0	0	0	0	0	0	25.47	0
Excédents (mm)	0	0	0	0	49.84	138.55	226.99	245.96	181.3	44.6	0	0

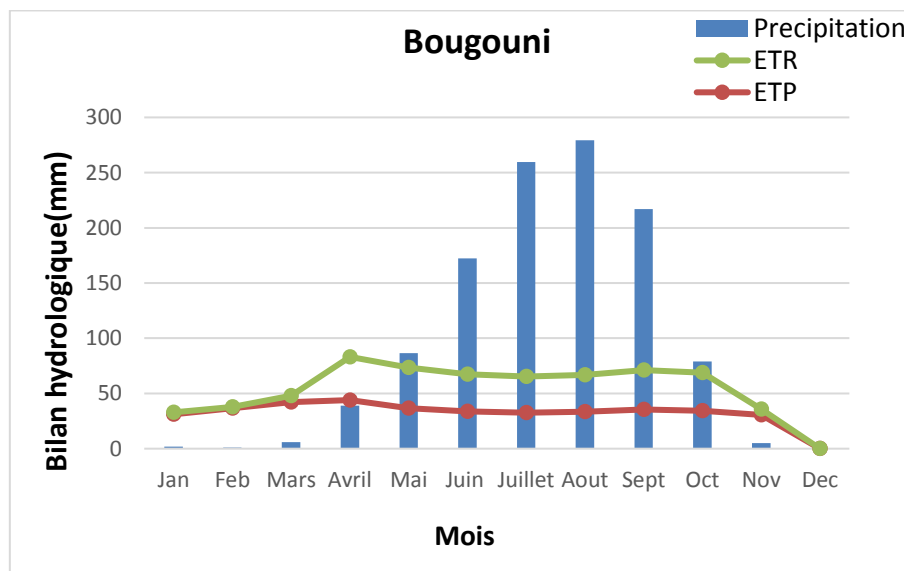


Figure 12: Bilan hydrologique mensuel (station de Bougouni, 2000-2015).

Le bilan hydrique mensuel des stations de Sikasso et de Bougouni de 2000 à 2015 indique une augmentation de l'évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP) pendant la période pluvieuse de Juin à Septembre.

2.1.3.2. Méthode de Turc:

Nous avons évalué l'évapotranspiration réelle (ETR) annuelle de la station de Sikasso par la méthode Turc (1954) à partir de la formule suivante :

$$ETR (mm) = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

ETR = Evapotranspiration réelle

P= Pluviométrie moyenne mensuelle

L= $300 + 25 T + 0.05 T^3$

Tableau 7:Evapotranspiration réelle ETR par la méthode de Truc (Station de Sikasso, 2000 -2015).

P : Pluviométrie; **T°C** : Température en degré Celsius ; **L** : Constante ;
ETR : Evapotranspiration réelle.

Station	P (mm)	T°C	L	ETR
Sikasso	18687,9	27,83	33279,89	16879,88

2.1.4. Estimation du ruissellement:

Le ruissellement peut être défini comme l’écoulement de l’eau à la surface du sol sous l’effet de la gravité. A l’aide de la méthode d’approche de Tixeront et Berkaloff (1974), nous avons estimé le ruissellement au niveau dans la région de Sikasso (station de Sikasso 2000-2015).

Selon Tixeront et Berkaloff pour une pluviométrie moyenne annuelle supérieure 600mm, le ruissèlement est obtenu par la formule suivante :

$$R \text{ (mm)} = \frac{P^3}{3}$$

R = Ruissellement (mm).

P = Précipitation moyenne annuelle (mm).

Tableau 8:Bilan de ruissellements à la station de Sikasso et Bougouni.

Station	Ruissellement
Sikasso	12,70 mm/an
Bougouni	15,24 mm/an

2.1.5. Estimation de l’infiltration:

Connaissant les résultats des autres paramètres climatiques (pluviométrie, ruissellement, évapotranspiration réelle), l’infiltration peut être obtenue par la formule suivante :

$$I \text{ (mm)} = P - (ETR + R)$$

I= Infiltration

R=Ruissellement

P=Pluviométrie moyenne annuelle

ETR= Evapotranspiration réelle

Tableau 9:Bilan d’infiltrations (Sikasso et Bougouni).

Station	Infiltration
Sikasso	879,49 mm/an
Bougouni	905,7 mm/an

Tableau 10:Estimation en pourcentage (%) du bilan hydrologique (Sikasso et Bougouni).

Station	P %	ETP %	ETR %	R %	I %
Sikasso	1167,98	37,44	23,61	1,08	75,30
Bougouni	1146,65	34,10	19,68	1,32	79

2.2. Hydrographie:

Le réseau hydrographique de la région de Sikasso est formé par quatre (04) principaux cours d'eau qui sont :

- **Le Sankarani:** un cours d'eau permanent, sur lequel est installé le barrage de Selingué. Il arrose essentiellement le cercle de Yanfolila et parcourt environ 200 Km dans la région. Son principal affluent est l'Ouassoulobalé.
- **Le Baoulé:** arrose les cercles de Kadiolo et Bougouni dans la région de Sikasso sur une distance de 500 Km. Ses principaux affluents sont le Banifing et le Dégou.
- **Le Bagoé:** un affluent du Bani lui-même affluent du fleuve Niger, le Bagoé arrose les cercles de Kadiolo, Kolondiéba et Sikasso sur une distance de 300 km.
- **Le Bafinin:** parcourt environ 200km dans la région. Son principal affluent est le **Lotio**. Il arrose les cercles de Kadiolo, Koutiala et Sikasso.

Le Baoulé, le Bagoé et le Bafinin sont des affluents du Bani, qui a son tour est aussi un affluent du fleuve Niger.

En plus de ces cours d'eau, il existe un riche potentiel de mares, de marigots et ruisseaux qui constituent environ les 75% du réseau hydrographique de la région de Sikasso.

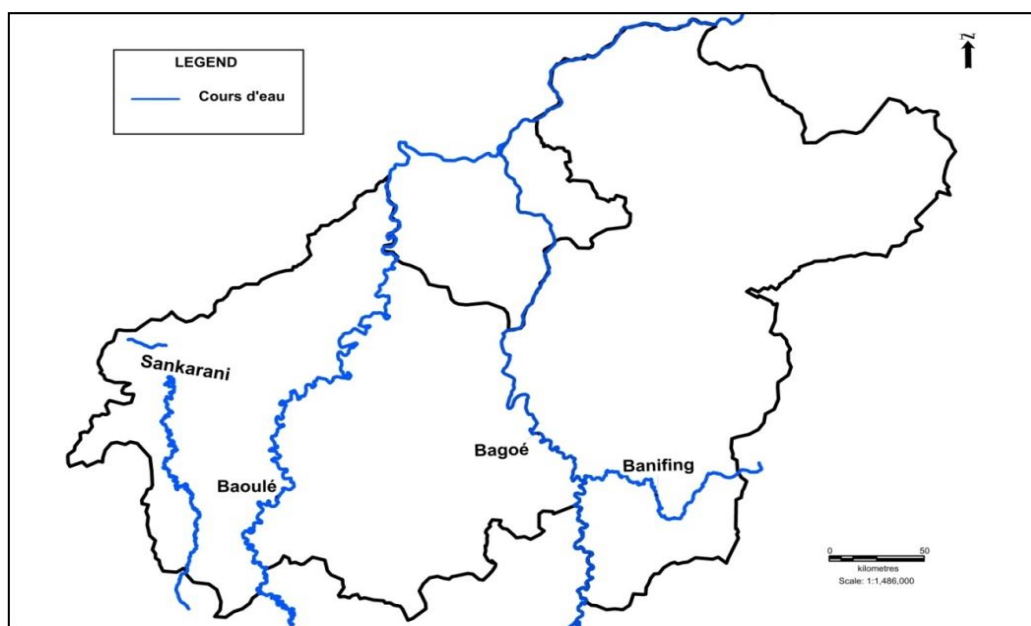


Figure 13: Les principaux cours d'eau de la région de Sikasso modifiée (Traoré, 2017).

2.2.1. Débit moyen mensuel:

Le débit d'un cours d'eau peut être défini comme étant le volume d'eau liquide traversant une section transversale de l'écoulement par unité de temps. Il s'exprime en m^3/s .

Afin d'estimer les débits moyens mensuels des cours d'eau dans la région de Sikasso (Bagoé, Baoulé), nous avons analysé les données recueillies par la **DNH** au niveau de la station de Pankourou (cercle de Bougouni) et la station de Dinso (cercle de Yanfolila).

Tableau 11: Localisation des stations hydrologiques.

Station	Coordonnées géographiques		Paramètres mesurés	Période d'observation	Cours d'eau
	Latitude	Longitude			
Pankourou	11°44 Nord	-6°57 Ouest	<ul style="list-style-type: none"> • Débit journalier • Hauteur de l'eau 	2002-2015	Bagoé
Dinso	10°48 Nord	-8°08 Ouest	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur de l'eau 	2002-2015	Baoulé

Tableau 12: Débit et hauteur moyen mensuel du Bagoé station de Pankourou (2002-2015).

Jan : Janvier ; **Fév. :** Février ; **Avr. :** Avril ; **Juil. :** Juillet ; **Sept :** Septembre ; **Oct. :** Octobre ;
Nov. : Novembre ; **Déc. :** Décembre.

Paramètre	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Débit moyen m ³ /s	71.01	35.04	14.76	48.66	23.95	52.60	175.89	442.80	717.38	612.87	311.46	142.03

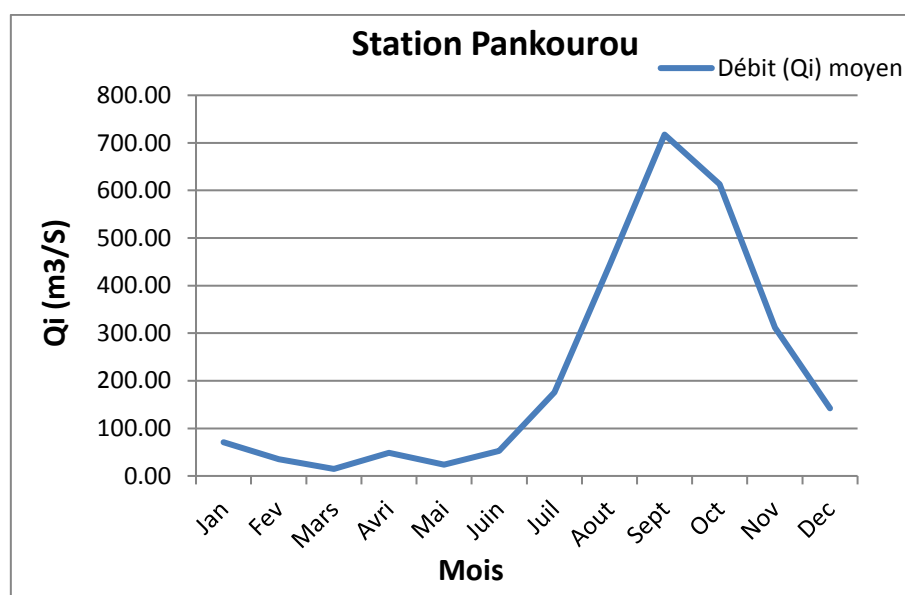


Figure 14: Débit (Qi) moyen mensuel du Bagoé (2002-2015).

L'analyse des données de la station de Pankourou de 2002 à 2015 dans la région de Sikasso nous permet de voir que le Bagoé atteint un débit maximum au mois de Septembre avec un débit moyen $Q_i=584.52\text{m}^3/\text{s}$ et un débit minimum au mois de Mars $Q_i=1.21\text{m}^3/\text{s}$.

Tableau 13: Débit et hauteur moyen mensuel du Baoulé Station de Bougouni (2002-2015).

Jan : Janvier ; **Fév. :** Février ; **Avr. :** Avril ; **Juil. :** Juillet ; **Sept :** Septembre ; **Oct. :** Octobre ;
Nov. : Novembre ; **Déc. :** Décembre.

Paramètre	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc
Débit moyen m ³ /s	6.80	2.09	0.56	0.23	1.69	5.21	41.30	155.42	311.28	245.62	86.19	21.61

On peut conclure à partir des graphiques présentes, que les deux stations marquent leurs périodes de grande eau entre Juillet et novembre et le mois de Décembre marque le début de la période d'été jusqu'en Mai.

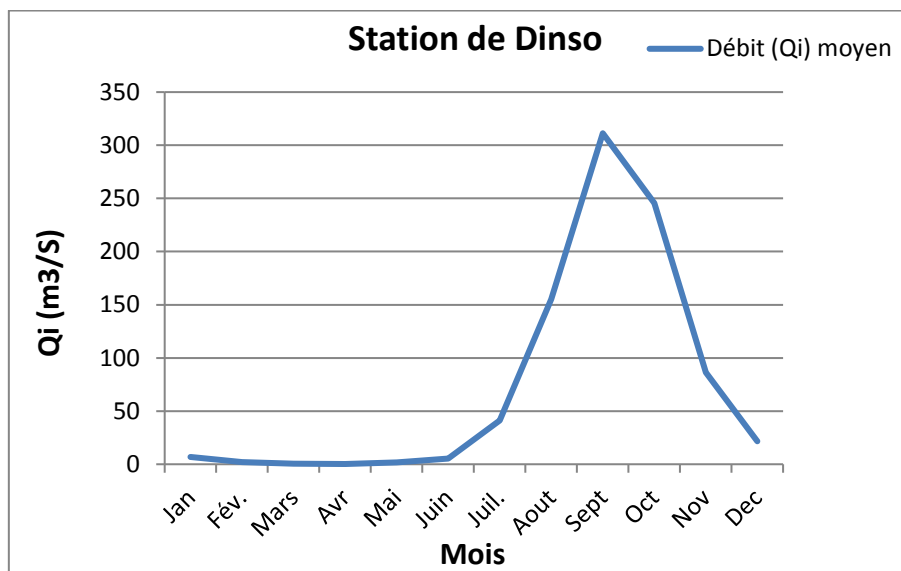


Figure 15: Débit (Qi) moyen mensuel du Baoulé (2002-2015).

Jan : Janvier ; Fév. : Février ; Avr. : Avril ; Juil. : Juillet ; Sept : Septembre ; Oct : Octobre ; Nov : Novembre ; Déc. : Décembre.

2.3. Biodiversité:

Située dans la zone bioclimatique soudanienne et soudano guinéenne, la région de Sikasso est dotée d'une grande diversité biologique avec des écosystèmes forestiers. Considérée comme la zone la plus humide du Mali, la région de Sikasso se divise en deux grandes régions naturelles : la région naturelle du plateau de Koutiala (PK) et la région naturelle du Haut Bani Niger (HBN) (PIRT, 1983).

40 à 90 % de la couverture végétale est composé de forêts galeries avec une bande de végétation dense et parmi les espèces végétales dominantes on peut citer : *Vitellaria paradoxa* (Shi), *Isobertinia doka*, *Detarium microcarpum*, *Combretum glutinosum*, *lannea microcarpa*, *Parinari curatellifolia*, *Parkia biglobosa*, *Annona senegalesis*, *Daniellia oliveri*.

Bien que la végétation soit mieux conservée que les régions naturelles des poches de dégradation existent vers les sites miniers (DNEF, 2009).

La région compte 26 forêts classées couvrant une superficie de 339 263 Ha, deux réserves de faune (Siankadougou et Niénendougou) dans le cercle de Bougouni ainsi que deux zones d'intérêt cynégétique (Niénendougou et Banzana) et parmi les espèces animales on rencontre:

Oryxctolagus cuniculus (Lapin), *Simia capucina* (Singe), *Myosciurus pumilio* (Ecureuil), *Alectoris barbara* (Perdrix) et la présence des *Loxodontus africana* (Eléphants) venant de la frontière ivoirienne.

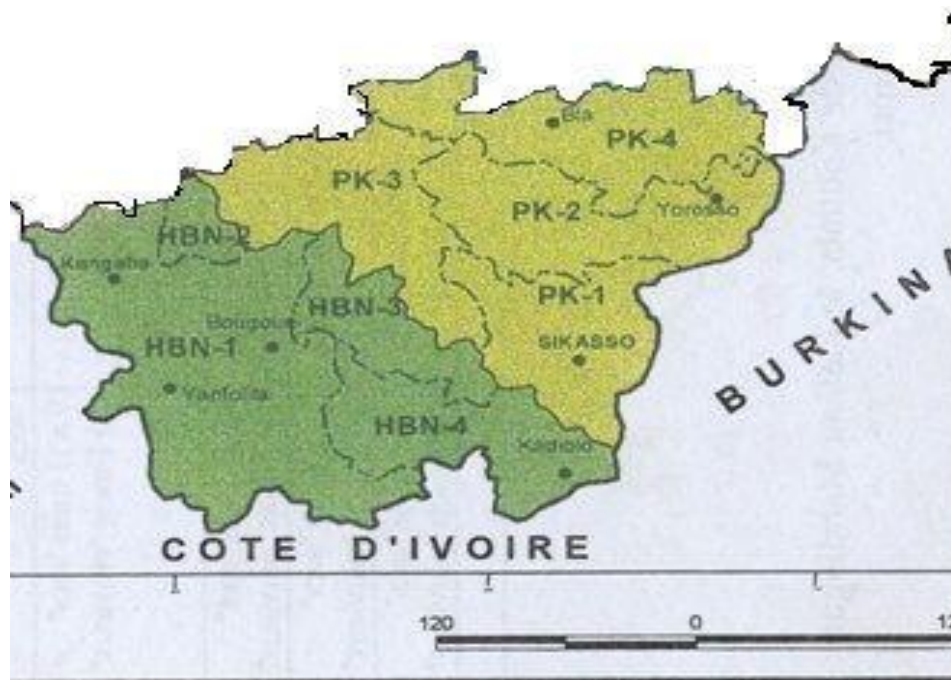


Figure 16: Régions naturelles agro écologiques de la région de Sikasso (PIRT, 1983).

3. EXPLOITATION MINIERE AU MALI:

Bien que le secteur minier soit l'un des premiers précurseurs de l'économie nationale du pays, le gouvernement malien, dans l'optique d'un développement durable et de la protection de l'environnement, s'est doté d'instruments juridiques, réglementaires et institutionnels en vue d'atteindre ses objectifs.

3.1. Cadre législatif et réglementaire:

Le Mali a élaboré plusieurs lois et décrets nationaux, parmi lesquels on peut citer entre autres:

- Loi N°01-020 du 30 Mai 2001 relative aux pollutions et aux nuisances.
- Loi N°02-006 du 31 Janvier 2002 instituant un code de gestion de l'eau en République du Mali.
- Loi N° 95-004 du 18 janvier 1995 fixant les conditions de gestion des ressources forestières.
- Loi N° 95-031 du 20 Mars 1995 fixant les conditions de gestion de la faune sauvage et de son habitat.

- Décret N° 01-394/P-RM du 06 Septembre 2001, fixant les méthodes de gestion de déchets solides.
- Décret N° 01-397/P-RM du 06 Septembre 2001 fixant les méthodes de gestion des polluants de l'atmosphère.
- Décret N° 01-595/P-RM du 06 Septembre 2001 fixant les méthodes de gestion des eaux usées et des vidanges.
- Décret N° 03-594/P-RM du 31 décembre 2003 relatif à l'Etude d'Impact Environnemental et Social (EIES).
- Loi 2012-015 du 27 Février 2012 portant sur le Code minier.

3.2. Conventions et accords internationaux sur l'environnement:

Le Mali a signé et ratifié plusieurs conventions et accords internationaux dans le cadre de l'extraction minière et la protection de l'environnement. Parmi ces nombreux textes, on peut citer :

- Le code international de gestion pour la fabrication, le transport du cyanure dans la production de l'or (mai, 2002).
- La convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (Paris, 1994), ratifiée en 1995.
- La convention sur la biodiversité de Rio de Janeiro en 1992.
- La convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNCC) en 1992.
- La convention de Bamako sur l'interdiction de l'importation en Afrique et le contrôle de mouvements transfrontaliers des déchets toxiques en Afrique (1991).
- La convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontaliers des déchets toxiques et leur élimination (1989).
- La convention de protection de la couche d'ozone (Vienne, 1985).
- La convention sur le commerce international des espèces de faune et flore en voie de disparition (Washington, 1973).
- La convention Africaine sur la protection de la nature et des ressources naturelles (Alger, 1968).
- La convention de Ramsar relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau (1971).

- La convention de Bonn relative à la protection des espèces migratrices et ratifiée en 1979.
- La convention de Rotterdam et Stockholm, sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet d'un commerce international, ratifiée en 2003.

3.3. Principales zones aurifères du Mali:

Le Mali occupe une position géologique très favorable en Afrique de l'Ouest et son sous-sol révèle de nombreux indices d'or, de diamant, de fer, de manganèse, de bauxites, de métaux de base, d'uranium, de phosphates, ainsi que plusieurs sites de roches industrielles, le calcaire, gypse, marbre, granite (CMM).

Longtemps considéré comme le troisième réservoir d'or du continent Africain après l'Afrique du Sud et le Ghana, les principaux gîtes aurifères qui font l'objet d'exploitation minière se localisent essentiellement dans des formations volcano-sédimentaires (roches vertes) d'âge Birimien et se répartissent dans deux grands districts repartis entre la région de Kayes, Koulikoro et Sikasso. On peut citer :

- A l'ouest, dans le cercle de Keniéba dans la région de Kaye, près de la frontière sénégal-malienne autrefois connu sous le nom de Bambouck avec le gîte de Sadiola (réserves de 150 tonnes d'or) exploité par Anglo-Américain depuis 1997, Yatela (40 tonnes en exploitation depuis Septembre 2001), Loulo (40 tonnes d'or prouvées), Tabakoto (43 tonnes), Faboula est en cours de construction.
- Au sud dans la région de Sikasso dans le district aurifère de Bourré avec les indices aurifères du Bagoé, de Yanfolila et de Kangaba, le gîte de Syama (avec 150 tonnes d'or) entré en production depuis 1990, le gisement d'or de Morila (évalué à 150 tonnes d'or), est entré en production en Février 2001, la gîte de Kalana en cours d'exploitation, et du gîte de Nampala en cours de construction.

Ces deux districts sont à leur tour subdivisés en zones d'exploitation minière artisanale (orpaillage) dont on dénombre 350 environs (CMM, 2017).

Le Mali possède une immense potentialité aurifère d'où l'obligation d'une restructuration, une organisation du secteur afin de jouer pleinement son rôle dans l'économie du pays et l'amélioration du revenu des exploitants traditionnels.

3.4. Gisements aurifères au Mali:

Les gisements aurifères sont groupés dans les dépôts primaires contenus dans les roches dures et les dépôts secondaires issus de l'altération météoritique érosion et/ou remobilisation d'autres dépôts, qui sont contenus dans les sols, les sédiments.

Au Mali, on rencontre les dépôts primaires (veine ou filon) et aussi les dépôts secondaires (alluviaux ou éluviaux).

3.4.1. Dépôts alluvionnaires:

Les dépôts alluvionnaires ou placers alluvionnaires se localisent dans les lits vifs, les terrasses fluviatiles récentes et anciennes dans lesquelles l'or s'est concentré dans les niveaux graveleux reposant sur le lit des cours d'eau inférieure à 1m.

La teneur en or des dépôts alluvionnaires varie entre 4 et 5 g/m³ pour une couche minéralisée (Wood, 1993), généralement couverte par des sédiments stériles ou faiblement minéralisés et dans le cas des terrasses anciennes, cette couverture peut facilement atteindre les 10 m d'épaisseurs.

L'exploitation de ce type de gisement est fortement signalée dans le Sud du Mali, principalement dans le lit de la rivière Bagoé, qui l'un des principaux cours d'eau de la région de Sikasso.

3.4.2. Dépôts éluvionnaires:

Contrairement aux dépôts alluvionnaires transportés par les eaux de ruissellement vers le lit des cours d'eau, les dépôts éluvionnaires résultent de la décomposition de la roche mère et transportés par le vent ou l'eau vers un sol plus proche d'un affleurement.

3.4.3. Veines ou filons:

Une veine ou filon peut être définie comme étant la roche haute ou roche mère contenant l'or. Le plus souvent l'or est associé à d'autres minéraux, dans ce cas on parle d'or réfractaire. Cette association peut se fait souvent avec le sulfure ou le sulfate dans ce cas on parle de gîte sulfuré, ou avec du cuivre la gîte porphyrique.

Depuis une dizaine d'années des filons affleurant ou enfouis sont exploités essentiellement dans la zone de Keniéba à l'Ouest du Mali et dans certaine zone de Yanfolila au Sud du Mali. L'exploitation des veines nécessite plus de moyens matériels, et le traitement du minerai demande souvent l'intervention de procéder chimique tel que la cyanuration ainsi que divers produits dangereuses, le mercure, le cyanure, des acides ...etc.

L'épaisseur des filons varie de quelques centimètres à un (01) mètre environ. Au-dessus de la nappe phréatique, les teneurs peuvent atteindre plusieurs centaines de grammes à la tonne en fonction des zones.

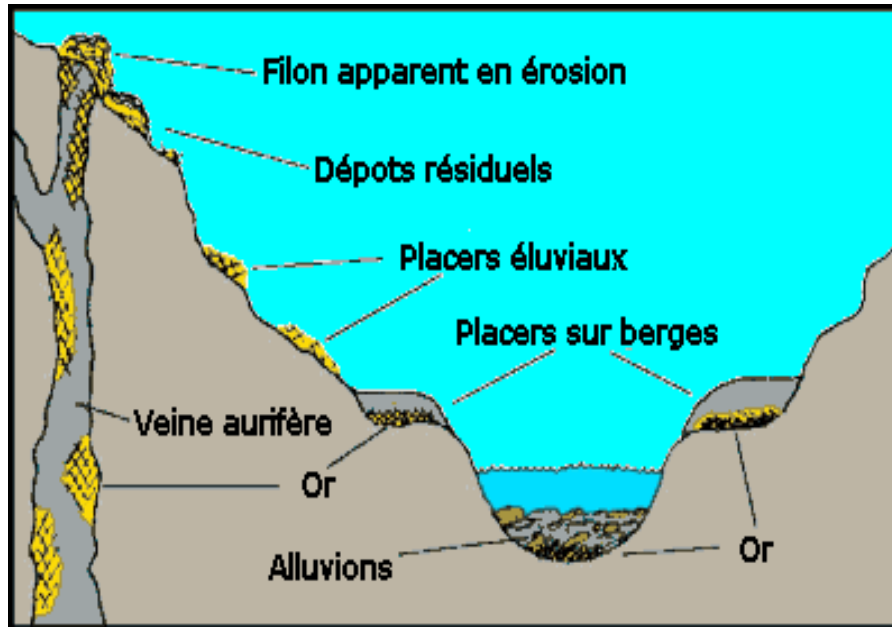


Figure 17: Gîte alluvionnaire et éluvionnaire.
(Source : www.orpaillage.fr/placer/placers_alluviaux.html.)

4. MATERIEL ET METHODOLOGIES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS AURIFERES:

L'exploitation aurifère se fait de façon industrielle (mines) mais aussi de façon artisanale (orpaillage).

4.1. Exploitation minière artisanale (Orpaillage):

Pratiqué depuis les temps anciens, l'orpaillage utilisait des moyens rudimentaires et simples (pèle, pics, calebasse, batée, table de lavage). Cependant le développement de cette activité entraîna l'utilisation d'équipements mécaniques ou semi mécaniques en vue d'accroître la production (détecteur de métaux, broyeur, concasseur, moto pompe, drague, explosifs).

En générale l'exploitation porte sur des placers alluvionnaires et éluvionnaires, et s'effectue en quatre (04) grandes phases :

- La phase d'exploration ;
- La phase d'installation (logement, activité commerciale) ;
- La phase d'extraction du minerai (fonçage ou dragage) ;
- La phase de traitement du minerai.

4.2. Exploitation minière industrielle:

L'exploitation minière industrielle permet une exploitation à grande échelle et nécessite l'utilisation d'équipements mécaniques et outils divers (camions bennes, machines, pelles, excavateurs, explosifs).

L'exploitation industrielle tout comme l'orpaillage se déroule en quatre (04) grandes phases qui sont la phase d'exploration ; la phase de construction des installations (usine, logement) ; la phase de fonçage ou mine; la phase de traitement du minerai à l'usine.

L'exploitation industrielle se pratique dans un cadre formel et se doit de respecter les lois et règlements imposés par le pays où a lieu l'exploitation.

4.3. Techniques de traitement des minerais d'or:

Les techniques de traitements utilisées dans l'exploitation minière dépendent principalement de la texture du minerai pouvant contenir de l'or libre dans les placers alluvionnaires, éluvionnaires, et de l'or réfractaire dans les veines ou filons.

On distingue trois (03) principales techniques de traitements selon le type de gisement exploité.

Il s'agit :

- La technique de concentration gravitaire,
- La technique d'amalgamation
- La technique de cyanuration.

4.3.1. Concentration gravitaire:

La concentration gravitaire historiquement est le moyen le plus utilisé pour extraire le métal natif en servant du chapeau chinois (batée), les rampes de lavage et les dragues.

La technique gravitaire est utilisée en particulier lorsque l'or est présent dans le minerai sous forme de particules grossières dispersées.

4.3.1.1. Batée:

La batée est la technique la plus utilisée dans l'exploitation des gisements alluvionnaires et éluvionnaires « placers » où, on peut récupérer des paillettes d'or.

La batée est un récipient en forme de cuvette arrondie ou de chapeau chinois qui est une méthode essentiellement manuelle de tri de sable, vase, graviers et particules selon leurs poids, en conservant les plus lourdes (or ou autres métaux lourds présents).

Le lavage à la batée implique la mobilisation et le lavage de grandes quantités de minerais, ainsi d'importantes ressources en eau. Elle est le plus souvent utilisée directement dans le lit des cours d'eau en lui donnant un mouvement tournant qui, grâce à la force centrifuge permet de séparer les paillettes du sédiment ou d'autres matériaux.

Cette technique est la moins coûteuse, la plus légère et la moins dégradante pour l'environnement. Par contre, c'est une technique fastidieuse et peu rentable. La quantité d'or obtenue par batée est très faible par rapports aux autres méthodes de traitement.

4.3.1.2. Lavage à l'écluse:

La prospection minière à petite échelle utilise couramment des rampes de lavage (dites boîtes d'écluse). L'installation est constituée d'un canal artificiel de bois dans lequel on fait couler un mélange de sédiment et de l'eau pour en extraire l'or.

Le fond de la boîte est constitué d'une série de radiers disposés de manière à créer des zones de moindre courant où se déposent les particules d'or plus lourdes que le reste des matériaux, plus tard les radiers sont complétés par des moquettes synthétiques dont les fibres retiennent les très fines particules.

Cette technique permet aussi de récupérer de petites particules encore présentes dans des stériles minières.

4.3.1.3. Dragage:

La drague utilise surtout soit un navire-drague, soit une barge ou un ponton équipé de manière adéquate pour remonter par godets ou par succion d'eau et de sédiments (drague aspiratrice) les matériaux constituant le lit de fleuves ou de rivières afin de les traiter. Les alluvions sont déversées sur une rampe disposée sur un radeau, la boue et les matériaux non retenus sont directement rejetés à l'eau.

Une vaste gamme de matériel a été développée pour ces usages, allant de grandes unités industrielles à de petites unités artisanales manipulées par deux personnes.

Le dragage est une méthode très destructrice pour le fond des cours d'eau et source d'augmentation de la turbidité des eaux.

4.3.2. Cyanuration:

La cyanuration est la technique la plus utilisée actuellement dans l'industrie minière à travers le monde. C'est un procédé plus complexe que celle de la concentration gravitaire et d'amalgamation et qui consiste d'abord à séparer les particules minérales (or, argent, etc..) de

la boue par immersion dans une solution de cyanure alcalin, l'or est récupéré par une addition de copeaux de zinc ou d'aluminium dans la solution du sel quadruple qui est ensuite acidifiée à l'acide sulfurique (H₂SO₄) afin d'éliminer l'excès de zinc et séchée dans un four à 800 °C en présence d'air pour oxyder le plomb, le fer et le zinc. Les résidus après une première fonte contiennent près de 80 à 90 % d'or.

La cyanuration présente un grand risque pour l'environnement en particulier pour les cours d'eau.

4.3.3. Amalgamation:

L'amalgamation est une très vieille méthode qui consiste à mettre l'or en contact avec du mercure (Hg) pour former un amalgame, qui est ensuite récupéré et chauffé dans un four pour en extraire le mercure laissant alors un résidu d'or.

Bien que l'amalgamation soit largement répandue, la récupération de l'or par cette méthode n'excède pas les 60%, particulièrement pour les minerais à grain d'or très fins ou quand le minerai contient d'autres métaux qui réagissent également avec le mercure. A l'état liquide ou gazeux, le mercure (Hg) est extrêmement toxique.

5. ORPAILLAGE DANS LA REGION DE SIKASSO:

Habituellement renommée pour ses potentialités agroforestières due à une pluviométrie abondante (1600 à 1000 mm), la région de Sikasso possède également un sous-sol très riche en ressource minière particulière en or. Cette ressource aurifère est répartie entre le cercle de Kadiolo, le cercle de Bougouni et cercle de Yanfolila. Actuellement la région compte 04 mines d'or en productions (Syama, Morila, Kalana, Wassoulor) ainsi qu'une nouvelle mine en construction à Nampala.

En plus de l'exploitation minière industrielle pratiquée par les mines, l'exploitation minière artisanale (orpaillage) est fortement pratiquée dans la région de Sikasso avec 120 sites d'orpaillages recensés (CCM, 2017) un chiffre en progression avec la découverte de nouveaux gisements d'or.

L'orpaillage dans la région de Sikasso porte sur les placers alluvionnaires, éluvionnaires et les veines ou filons et l'exploitation se déroule en quatre (04) principales phases mentionnées précédemment (**Chapitre II, paragraphe 4.1**).

5.1. Phase d'exploration:

C'est la phase préliminaire, elle permet d'identifier les zones potentiellement riches en minerais aurifères. Pour ce faire, certaines personnes expérimentées dans la lithologie du sol réalisent des puits témoins (fonçage) allant de 1 à 10 m de profondeur. La texture du sol et les types de roches présentes permettent de confirmer la présence ou non de l'or.

Certains sites sont aussi découverts à l'aide des machines détecteurs de métaux et par la bioindication à travers certaines espèces de plantes telle que le Lingue (*Afzelia africana*).



Illustration 1: Recherche de l'or par le détecteur de métaux.
(Site de Massiogocoro, 2018 ; Photo personnelle).

5.2. Phase d'installation:

Une fois que la présence de l'or est confirmée par les experts ou par les détecteurs de métaux dans une zone, ce dernier fera l'objet d'une colonisation très rapide par les orpailleurs venant de tous les horizons, certains avec leurs familles et d'autres dans le but de réaliser du business (commerce, maison close, etc...).

Des petites maisonnettes en plastique et en bois sont construites en guise d'habitation temporaire pour certains et pour d'autres permanente.



Illustration 2: Camp d'orpailleurs.
(Site de Massiogocoro, 2017 ; Photo personnelle).

5.3. Phase d'extraction:

L'extraction du minerai peut se faire par fonçage (mine) et ou par dragage du lit des cours d'eau (alluvion).

5.3.1. Mine ou fonçage:

Le fonçage consiste à creuser des puits localement appelés au Mali « **Damans** » à l'aide de piquage en vue d'atteindre la couche minéralisée et dont la profondeur varie en fonction du type de gisement exploité :

- 1 à 10 m de profondeur sur 1,5m de diamètre pour les placers alluvionnaires et éluvionnaires ;
- 10 à 50 m pour les veines ou filons, des soutènements en bois sont utilisés pour éviter l'effondrement des puits.

Le minerai est ensuite remonté à la surface par traction manuelle à l'aide d'une corde et d'un seau, ou à l'aide d'une poulie pour être traité.

Plusieurs puits peuvent être interconnectés entre eux sous forme de galerie à l'aide de canaux horizontaux souterrains pouvant atteindre 500 m de longueur, creusés par les orpailleurs pour suivre les filons minéralisés.



Illustration 3:Fonçage et extraction du minerai.
(Site de Farabacoura, 2016 ; Photo personnelle).

5.3.2. Dragage:

Des dragues à succions sont installées pour faire remonter à la surface sur des rampes de lavage du minerai des placers alluvionnaires du fond des cours d'eau et en récupérer l'or.



Illustration 4:Drague dans le lit de la rivière Bagoé.
(Site de Massiogocoura, 2017 ; Photo personnelle).

5.4. Phase de traitement et récupération de l'or:

Les techniques utilisées varient en fonction de la nature et la texture du minerai qui peut être soit oxydé (alluvionnaire, éluvionnaire) ou réfractaire (veine ou filon).

5.4.1. Minerai oxydé:

Le traitement du minerai oxydé se fait généralement par la technique de la concentration gravitaire (la batée et ou lavage à l'écluse) et ou par amalgamation.

Le minerai extrait est soit transporté vers un point d'eau proche du site d'orpaillage (fleuve, rivière, marigot ou même des puits de mine), ou des trous de 1 à 2 m² localement appelé au Mali « **Dougouso** » sont creusés et remplis d'eau à l'aide d'une moto pompe à partir d'un point d'eau proche. Le traitement est généralement effectué par les femmes et les enfants.



Illustration 5: Traitement par batée du minerai au bord de la rivière.
(Site de Massiogocoro, 2016 ; Photo personnelle).

5.4.2. Veine réfractaire:

Le minerai extrait est associé à d'autres éléments sous forme de roche. Dans ce cas, on parle d'or réfractaire et pour ce type de minerai, deux (02) techniques sont employées : la cyanuration et l'amalgamation.

L'application de ces méthodes de traitement complexes nécessite une formation adéquate mais elles sont néanmoins pratiquées par les orpailleurs et de la manière suivante :

5.4.2.1. Test de teneur:

Une fois le minerai extrait, un échantillon de roche est broyé à l'aide d'un mortier et un pilon métallique, la poudre fine obtenue après broyage passe au vannage par batée.

Ce test a pour objectif de définir la teneur du minerai en or afin d'éviter toute perte de temps.

Si le test est négatif (teneur faible ou pas d'or), le minerai extrait est directement mis au dépôt

de stérile. Par contre, si le test positif (forte teneur en or), le minerai est introduit dans le circuit de traitement.



Illustration 6: Concassage et test de la teneur du minerai en or (site de Kalako, 2016).

5.4.2.2. Concassage et broyage:

Le concassage est effectué manuellement à l'aide d'un mortier et d'un pilon en vue de réduire la taille des roches, cette tâche est réalisée en grande partie par les femmes et les enfants. Une fois le concassage terminé, le minerai passe au moulin pour être broyé et obtenir une poudre fine. Les moulins utilisés sont généralement de fabrication artisanale, il s'agit d'une modification du disque d'un moulin à mil en le remplaçant par un disque plus résistant.



Illustration 7: Broyage au moulin du minerai en poudre fine.
(Site de Kalako, 2016 ; Photo personnelle).

5.4.3. Récupération de l'or:

Deux (02) techniques de récupération sont utilisées, celle de l'amalgamation et ou la cyanuration.

5.4.3.1. Amalgamation:

L'amalgamation dans l'orpaillage consiste à malaxer la poudre fine (minerai) obtenue après le broyage avec de l'eau savonneuse (06 paquets de détergents de 25 g pour 50 Kg de minerai) pour obtenir une patte compacte, homogène qui est ensuite lavé sur rampe munie d'un tapis servant à piéger l'or et les stériles sont drainés dans un trou de 1 à 2m² environs. Le tapis de la rampe est rincé dans un récipient (calebasse, chapeau chinois) avec de l'eau pour le libérer du minerai riche en or contenu dessus.

Une dose de mercure (Hg) est rajoutée au minerai contenu dans le récipient (amalgamation) afin de concentrer tout l'or en un seul morceau (pépite), qui sera ensuite chauffé (minerai réfractaire) à l'aide d'une bombonne à gaz pour éliminer le mercure et l'or apparaît sous couleur jaunâtre.



Illustration 8: Lavage à l'écluse du minerai.



Illustration 9:Amalgamation à main nue du minerai.



Illustration 10:Pépite d'or mélangée au mercure (Hg).



Illustration 11:Combustion de l'amalgame .

5.4.3.2. **Cyanuration:**

En orpillage artisanale, la technique de cyanuration est grande partie effectuée sur les stériles issues du processus d’amalgamation et qui sont revendues à d’autres orpailleurs majoritairement des Burkinabès (**Mossis**), possédant des installations à l’intérieur de la forêt pour subir un second traitement, cette fois-ci par cyanuration.

Ce second traitement un peu plus complexe que les deux (02) précédents (concentration gravitaire ; l’amalgamation), il consiste à disposer les stériles dans des bassins de 1,5.x 0.90m² et 0,6m de profondeur creusés à même le sol et recouverts par des bâches en film polyane imperméables de façon à éviter toute infiltration. La boue de stérile est ensuite mélangée au cyanure et de l’eau respectivement 1litre et 800litres, le lixiviat or-cyanure est recueilli sous la bâche par des conduites contenant du papier de zinc qui récupère l’or.

La solution de cyanure et l’eau retournent dans le bassin, le papier de zinc contenant l’or passe dans une première solution d’acide sulfurique (H₂SO₄) pour éliminer le zinc qui se traduit par une formation de sulfate de zinc (ZnSO₄), puis dans une seconde solution d’acide nitrique (NaOH) pour oxyder le plomb, le fer et le reste de zinc.

L’ensemble du processus peut prendre deux (02) à trois (03) semaines (**Sorgho, 2012**).

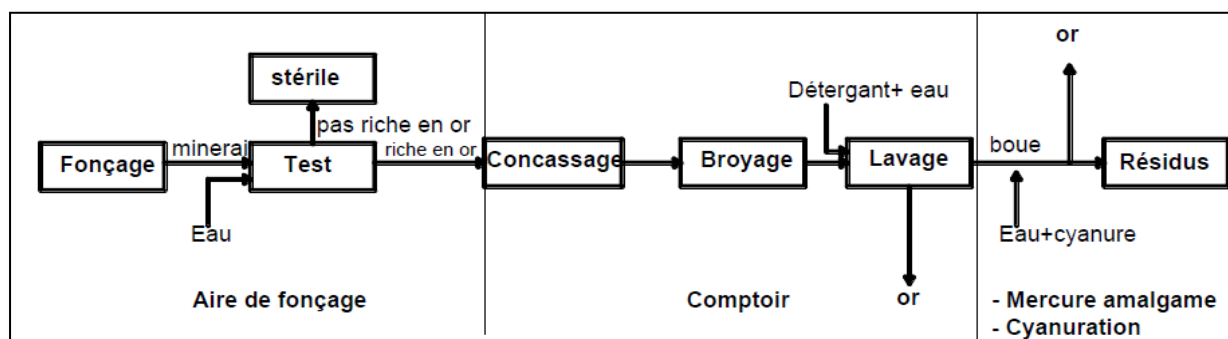


Figure 18: Schéma du processus de récupération de l’or.

6. **QUALITE ECOLOGIQUE DES COURS D’EAU:**

L’eau est une ressource naturelle précieuse à usages multiples (domestiques, industriels, agricoles) indispensable à la vie et dont la qualité est un facteur influent de l’état de santé et la mortalité des humains et des animaux (**Kazi et al. 2009**).

Depuis le début du siècle dernier, le développement industriel ainsi que l’intensification des activités anthropiques font subir d’énormes pressions aux ressources hydriques, en particulier les eaux de surface (fleuve, rivière marigots, lacs, étangs) entraînant une pollution accrue.

La qualité d’un cours d’eau dépend de la variabilité des paramètres physico-chimiques et biologiques qui la compose.

Ainsi plusieurs réseaux de surveillance ont été mis en place un peu partout dans le monde, afin d'évaluer et suivre la qualité des cours d'eau pour un retour à l'état d'équilibre (bonne qualité) et pour une meilleure protection des écosystèmes aquatiques.

6.1. Etat de connaissance sur les macroinvertébrés benthiques d'eau douce:

Les bioindicateurs sont utilisés pour déceler les changements qui surviennent dans l'environnement, la présence de pollution, mesurer les effets de ces perturbations sur l'écosystème et surveiller les améliorations de la qualité de l'environnement résultant de la prise de dispositions remédiatrices (**Harrag, 2012 ; Banaru et Perez, 2010**).

Les macroinvertébrés benthiques sont des organismes aquatiques visibles à l'œil nu, dont la taille à la fin de l'état larvaire dépasse les un (01) millimètre (**Illies, 1978**). Ils ne possèdent pas de colonne vertébrale et habitent sur le fond des milieux aquatiques durant tout leur cycle de vie ou pour une partie seulement (**MDDEP, 2011**).

Les principaux taxons sont les vers, les mollusques, les crustacés, les insectes et les échinodermes (**MDDEP, 2011**).

6.1.1. Caractéristiques des macroinvertébrés benthiques:

Les macroinvertébrés benthiques possèdent une systématique importante et diversifiée, et colonisent une grande variété d'habitats et de microhabitats : sous les pierres, les sédiments, les débris organiques ou à la surface des macrophytes.

Les macroinvertébrés benthiques sont fréquemment utilisés comme bioindicateurs de qualité dû à leur abondance dans la majorité des écosystèmes aquatiques, leurs sédentarités et ils possèdent un cycle de vie relativement long (quelques mois à des années) leurs permettant d'intégrés tous les caractéristiques de leurs environnements, mais aussi l'échantillonnage des macroinvertébrés est très facile à réaliser et demande peu de moyens (**US EPA, 2012**).

6.1.2. Macroinvertébrés benthiques d'eau douce d'Afrique:

En Afrique particulièrement au Mali, l'état de connaissance des macroinvertébrés benthiques est à un stade rudimentaire néanmoins, quelques études sur la faune aquatique (**Déjoûx et al, 1983 ; Daget 1954**) ont été réalisées dans certains pays d'Afrique.

Parmi les principaux macroinvertébrés benthiques rencontrés dans les cours d'eau douce africaine sont : les insectes, les mollusques, et oligochètes.

6.1.2.1. Insectes:

On distingue deux principaux groupes d'insectes aquatiques : ceux à métamorphose graduelle constitués (Hémiptères, Odonates, Ephéméroptères, Plécoptères) et ceux à métamorphose complète (Diptères, Trichoptères, Mégaloptères, Coléoptères et Lépidoptères).

Chez la majorité des espèces aquatiques, seuls les stades immatures vivent dans l'eau, la plupart les adultes sont terrestres, exception faite sur quelques Hémiptères et Coléoptères dont tout le développement larvaire et adulte se fait dans l'eau.

- Diptères:

Les diptères constituent le deuxième ordre après le plus important des insectes en espèces après les coléoptères. Ce groupe à métamorphose complète effectue en stade larvaire 3 à 4 mues allant de plusieurs semaines à deux (02) ans selon les espèces (**Denis, 2001**). La plupart des espèces sont terrestres, seules quelques familles sont adaptées à la vie aquatique au stade larvaire et nymphal et pour certaines familles seules quelques genres et espèces le sont

En milieux aquatiques, la famille la plus importante est celle des Chironomidae et sont tolérantes à la pollution (**Hilsenhoff, 1988 ; Plafkin, 1989 ; US EPA, 2007**), les autres familles ont une tolérance moyenne à la pollution.

- Trichoptères:

Les trichoptères appartiennent à un ordre d'insecte dont les larves et les nymphes sont aquatiques (**MDDEP, 2010**), les œufs fécondés sont déposés sur des substrats immergés et se développent entre 1 à 3 semaines et la plupart des larves construisent des fourreaux avec des particules du substrat (sable, graviers, ou feuilles) ou de la soie secrétée et y sont spécifiquement liées (**Danis, 2001**).

Les trichoptères en milieux aquatiques sont sensibles à la pollution (**MDDEP, 2010 ; Hilsenhoff, 1988 ; Plafkin 1989 ; US EPA, 2007**).

- Coléoptères:

C'est l'ordre le plus important des insectes de par sa diversité spécifique et leurs adaptations à la vie aquatique sont multiples. Chez certaines familles, les larves et les adultes sont aquatiques ou encore seules les larves ou seuls les adultes le sont, par contre d'autres familles sont exclusivement terrestres. Dans les eaux africaines (tropicales), les familles les plus nombreuses sont celles des Hydraenidae, Dystiscidae et les Staphilinidae (**Auber, 1976**). En milieux aquatiques, les coléoptères ont une tolérance moyenne à la pollution.

- **Mégaloptères:**

Les mégaloptères comptent très peu d'espèces seulement deux (02), toutes aquatiques à l'état larvaire et terrestre à la ponte, y compris les pupes et adultes.

L'éclosion des œufs se fait la nuit, et les nouvelles larves sont déposées dans l'eau pour entamer leur stade larvaire. Les mégaloptères sont des prédateurs, et en milieu aquatique ils ont une tolérance moyenne à la pollution.

- **Hémiptères:**

Dans les habitats aquatiques ou semi aquatiques, les hémiptères peuvent se trouver sous forme larvaire, ou adulte et sont tous presque identiques, si ce n'est que certains adultes possèdent des ailes. Cet ordre est constitué d'insectes qui ne nagent pas, mais qui marchent ou patinent à la surface de l'eau (**China et Usinger, 1949**) et les familles les plus abondantes sont les Veliinae, Nepinae et les Hydromitinae (**Denis, 2001**).

En milieu aquatique les hémiptères ont une tolérance moyenne à la pollution (**MDDEP, 2010 ; Hilsenhoff, 1988 ; Plafkin et al., 1989**).

- **Ephéméroptères:**

Les éphéméroptères appartiennent à un ordre d'insectes dont les larves sont exclusivement aquatiques, et la longévité de l'adulte est très courte 1 à 3 jours (**Denis, 2001**).

Les œufs sont déposés dans l'eau ou sur des objets submergés et l'éclosion a lieu quelques semaines plus tard. Les éphéméroptères effectuent un nombre de mues considérables 20 à 40 et quelques espèces vivent à l'état nymphal pendant plus de deux (02) ans.

En milieu aquatique les éphéméroptères sont très sensibles à la pollution (**MDDEP, 2010 ; Hilsenhoff, 1988 ; Plafkin et al., 1989**).

- **Plécoptères:**

Les plécoptères appartiennent à l'ordre des insectes et dont les larves sont exclusivement aquatiques et associées aux eaux fraîches et propres. Les plécoptères ressemblent aux éphéméroptères dont on les distingue grâce aux deux griffes qu'ils ont au bout des pattes tandis que les larves d'éphéméroptères n'en ont qu'une et les plécoptères possèdent deux queues (Cerques) et les éphéméroptères en ont trois (03). De façon générale les plécoptères sont sensibles à la pollution.

- **Odonates:**

Les odonates (libellules et demoiselles) appartiennent à l'ordre des insectes et dont les larves sont exclusivement aquatiques. Les odonates se divisent en deux (02) grands sous ordres qui sont : les Zygoptères qui sont souvent de petite taille et de forme gracile d'où leur nom de demoiselles et les Anisoptères ou libellules qui regroupent des odonates de taille moyenne à grande.

Les odonates préfèrent les eaux calmes souvent associées à la végétation et ils ont une tolérance moyenne à la pollution.

- **Lépidoptères:**

Les lépidoptères (papillons) appartiennent à l'ordre des insectes, majoritairement terrestres tout le long de leur développement. Cependant, il existe quelques genres dont les larves et les nymphes sont aquatiques et certaines d'entre elles à l'instar des Trichoptères se construisent un étui.

On retrouve les lépidoptères occasionnellement dans les prélèvements benthiques, leur tolérance à la pollution est moyenne (MDDEP, 2010).

6.1.2.2. **Mollusques:**

Les mollusques sont des invertébrés à corps mou dont la plupart possèdent une coquille externe en calcaire (MDDEP, 2010).

On distingue huit (08) classes de mollusques, dont deux (02) seulement sont présents au niveau des cours d'eau douce (les gastéropodes et les pélécy-podes ou encore Bivalves) (Thiam et al, 2010).

- **Gastéropodes:**

Les gastéropodes communément appelés escargots, sont des mollusques formés d'une seule coquille spiralée autour d'un axe imaginaire. On distingue deux (02) ordres de gastéropodes (les Mésogastéropodes et les Basommatophores).

En Afrique soudanienne, les principales familles de l'ordre des Mésogastéropodes rencontrés sont les Pilidae, Viviparidae, Thianidae, Bythinidae et de l'ordre des Basommatophores, on rencontre les familles des Ancyliidae, Planorbidae, Bulinidae et Lymnaeidae.

En milieux aquatiques les Prosobranches ont une tolérance moyenne à la pollution et les Pulmonés sont considérés tolérants à la pollution.

- **Bivalves:**

Les bivalves sont caractérisés par la présence de deux valves jointes par une charnière comme chez les moules. Les bivalves se composent d'un seul ordre celui des Eulamellibranches et de deux sous-ordres les Schizodonta et les Hétérodonta.

En Afrique soudanienne, on rencontre la famille des Unionidae, Mutelidae, Etheriidae du sous-ordre des Schizodonta et la famille des Corbiculidae et Sphaeriidae du sous-ordre des Hétérodonta.

En milieux aquatique, les bivalves ont une tolérance moyenne à la pollution.

6.1.2.3. Oligochètes:

Appartenant à l'embranchement des Annélides, les oligochètes sont caractérisés par un corps mou, allongé, cylindrique et portant des soies, parfois difficile à voir.

Les Naididae constituent avec les Tubificidae, les deux principales familles d'oligochètes aquatiques (**Denis, 2001**). Les oligochètes sont tolérants à la pollution.

6.1.2.4. Crustacés:

Les crustacés constituent un sous embranchement des arthropodes, la plupart des espèces sont aquatiques (marine ou dulçaquicole) quelques-unes mènent une vie totalement ou partiellement terrestre (isopodes et cloportes).

En milieux aquatiques les crustacés ont une tolérance moyenne à la pollution (**MDDEP, 2010**).

6.1.3. Bioindication de la qualité des cours d'eau:

Le calcul des indices biotiques permet d'évaluer la qualité d'un cours d'eau. Depuis plusieurs décennies, des chercheurs ont développé des méthodes de calcul pour évaluer la qualité des cours d'eau basée sur la tolérance aux pollutions des espèces bioindicatrices dont les plus utilisées sont les macroinvertébrés benthiques (**Hilsenoff,1987 ; DCE, 2004**).

6.3.3.1. Indice biotique de famille (Hilsenhoff ,1987):

L'indice biotique de famille (IBF) permet d'estimer le degré de tolérance d'une communauté bioindicatrices présente dans une aire d'échantillonnage, à travers la mesure de l'abondance relative de chaque groupe de taxons (famille, genre et espèce).

6.3.3.1.1. Méthodologie:

L'indice biotique de famille (IBF) attribue à chaque organisme un nombre de tolérance allant de 0 à 10 en fonction de la sensibilité de l'organisme à la pollution : 0 pour les plus sensibles, et 10 pour les plus tolérants à la pollution.

$$IBF = \frac{\sum ni * ai}{N}$$

IBF = Indice biotique de famille

ni = Nombre d'individus du taxon i

ai = Valeur de tolérance du taxon i

N = Nombre total d'individus échantillonnés

6.3.3.1.2. Analyse et interprétation:

Après une observation de tous les groupes échantillonnés, une moyenne est calculée par la formule mentionnée en amont (paragraphe 6.3.3.1.1.) et le résultat est comparé aux valeurs de références d'Hilsenhoff afin de classer la qualité du cours d'eau étudié :

- Une faible moyenne désigne une abondance relative des taxons sensibles à la pollution indiquant une faible pollution du cours d'eau.
- Une forte abondance relative des taxons tolérants à la pollution indique un cours d'eau pollué.

Tableau 14: Evaluation de la qualité de l'eau d'Hilsenhoff (traduit en français).

Indice biotique de famille (Hilsenhoff, 1987)	Qualité de l'eau	Degré de pollution organique
0,0 – 3,75	Excellent	Pas de pollution organique
3,76 – 4,25	Très Bien	Possible légère pollution organique
4,26 – 5,00	Bien	Possibilité de pollution organique
5,01 – 5,75	Assez Bien	Pollution Organique substantielle
5,76 – 6,50	Médiocre	Pollution organique
6,51 – 7,25	Mauvaise	Forte pollution organique
7,26 – 10,00	Très Mauvaise	Sevère pollution organique

6.3.3.2. Indice biotique global normalisé (IBGN):

L'indice biologique global normalisé (IBGN) est la méthode française normalisée d'évaluation de la qualité biologique d'un cours d'eau (NF T90-350- AFNOR*, 1992, révisée en 2004). Cette méthode permet d'évaluer l'aptitude globale d'un milieu à héberger des êtres vivants en

prenant en compte à la fois la variété des macroinvertébrés benthiques, et la représentativité des habitats présents sur la station.

L'IBGN repose sur les mêmes principes fondamentaux que les autres indices biotiques précédemment utilisés dans la détermination de la qualité biogène des eaux et reste l'une des méthodes les plus utilisées en Europe notamment dans le cadre de la directive cadre européen sur l'eau (**DCE 2000/64/EC**).

Appliquée comparativement, l'IBGN permet d'évaluer l'effet d'une modification du milieu de type naturel (affluence, modification du substrat, réchauffement des eaux...etc.) ou provoquée.

6.3.3.2.1. Protocole d'application (IBGN):

L'application de l'IBGN est limitée aux cours d'eau douce accessibles à pieds dont la profondeur n'excède pas 1m sur la majorité du lit mouillé.

Les macroinvertébrés sont échantillonnés à l'aide d'un filet de type suber avec une surface de base de $1/20^e$ de m^2 et 500 μm de maille et l'échantillonnage est constitué de 8 prélèvements qui doivent être réalisés sur des substrats différents suivant l'ordre défini par la norme qui privilégie les substrats biogènes (l'habitabilité) et tient compte de la vitesse du courant. L'identification et le dénombrement des taxons se font au niveau de la famille, sauf pour les oligochètes, Némathelminthes, Hydracariens, Hydrozoaires, Spongiaires, Bryozoaires et Némertiens qui restent au niveau taxonomique précité.

Une liste finie de cent cinquante-deux (152) taxons (voir annexe 3) dont trente-huit (38) sont définis comme taxons indicateurs et classés en neuf (09) groupes faunistiques correspondant à une polluosensibilité décroissantes de 9 à 1 qui permettent d'estimer les différents paramètres nécessaires au calcul de la note IBGN.

La note IBGN varie de 0 à 20 correspondant à 5 classes de qualité, qui intègre à la fois l'influence de la qualité physico-chimique de l'eau et l'influence des caractéristiques morphologiques et hydrauliques du cours d'eau. Le calcul de l'indice se fait en trois étapes qui sont :

- La détermination de la « classe de variété taxonomique » qui, sur la base des cent cinquante-deux (152) taxons potentiellement présents, est égale au nombre de taxons récoltés même s'ils ne sont représentés que par un seul individu, quatorze classes de variétés sont définies ;
- Le groupe faunistique indicateur, en ne prenant en compte que les taxons indicateurs représentés dans les échantillons par au moins trois individus ou dix selon les taxons ;
- Le calcul de l'indice en lui-même est obtenu par la formule suivante :

IBGN= N° du groupe faunistique indicateur + (N° de classe de variété -1) avec IBGN \leq 20.

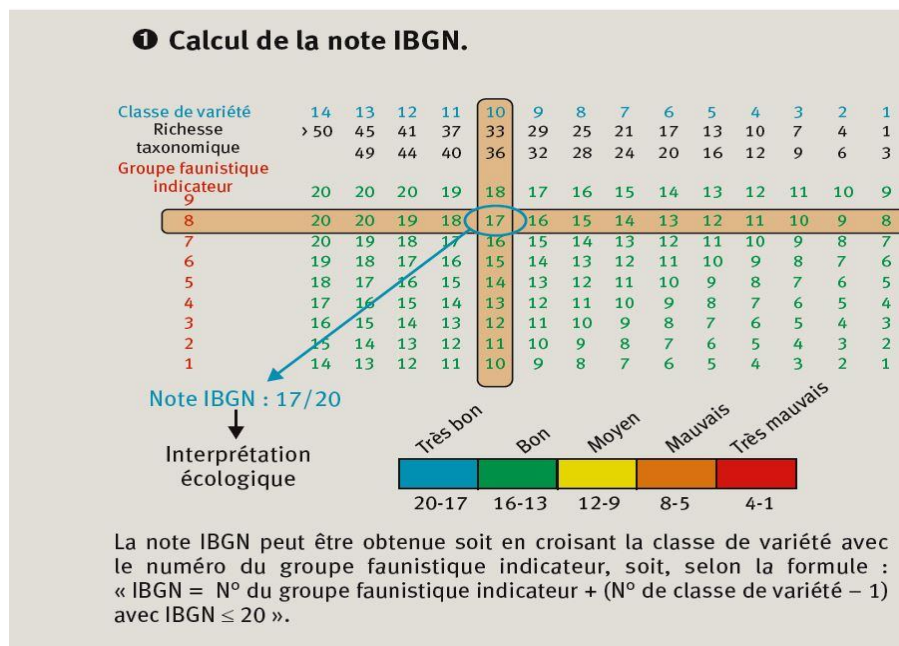


Figure 19:Matrice de calcul (IBGN).

L'IBGN est une méthode intéressante, car c'est un outil permettant une représentation synthétique et rapide de l'écosystème étudié. Il prend en compte l'ensemble des invertébrés de la communauté pas uniquement les plus sensibles, et tient également compte de la sensibilité des organismes. L'IBGN présente une certaine commodité de récolte, de manipulation et d'exploitation des données, par ailleurs il présente de larges possibilités d'applications dans le cadre du suivi de la qualité écologique d'un cours d'eau. En effet l'IBGN peut être utilisé avec l'objectif de situer la qualité biologique d'un site considéré isolément, de suivre son évolution temporelle, ou encore de caractériser un gradient spatial (amont –aval perturbation).

Néanmoins comme chaque méthode, l'IBGN présente également certaines limites puisqu'il n'est pas applicable dans les zones de sources (en raison de la spécificité des faunes associées), ou dans les zones profondes (comme les grands cours d'eau, les estuaires ou les canaux) et de par son caractère global, il ne permet pas de différencier l'évolution du milieu de la variabilité saisonnière due aux cycles biologiques de la faune en place, ni d'identifier la nature exacte de la perturbation.

6.3.3.2.2. Interprétation des classes en fonction des potentialités biologiques:

La dégradation des écosystèmes d'eau courante se traduit par l'action unique ou conjuguée de stress chimiques ou physiques qui s'y opèrent et qui produisent une séquence typique de changements biotiques avec l'augmentation des pressions (Davies et Jackson, 2006).

La potentialité biologique exprime l'aptitude d'une eau à permettre les équilibres biologiques ou plus simplement l'aptitude de l'eau à la biologie, lorsque les conditions hydrologiques et morphologiques conditionnant l'habitat des êtres vivants sont par ailleurs réunies (**MEDD et Agence de l'eau, 2003**). La directive cadre européen sur l'eau (**DCE**) a attribué des valeurs seuils aux paramètres physico-chimiques (Voir annexe 3) qui conditionnent la vie biologique selon la classe d'eau considérée.

Les cinq (05) classes d'aptitude à la biologie traduisent une simplification progressive de l'édifice biologique incluant la disparition des taxons polluosensibles et chaque classe d'aptitude est définie par la présence ou non de taxons polluosensibles et la diversité des peuplements (**DCE, 2004**).

Bleu (Très bonne) :

Les eaux de classe bleue sont de très bonne qualité et ont la potentialité d'héberger un grand nombre de taxons polluosensibles, avec une diversité satisfaisante. La note IBGN ≥ 17 .

Vert (Bonne) :

Les eaux classées vertes sont de bonne qualité et ont la potentialité de provoquer la disparition de certains taxons polluosensibles avec une diversité satisfaisante. La note IBGN est entre 13 et 16.

Jaune (Moyenne) :

Les eaux de classe jaune sont de qualité moyenne et ont la potentialité de réduire de manière importante le nombre de taxons polluosensibles avec une diversité satisfaisante.

La note IBGN est entre 9 et 12.

Orange (Mauvaise) :

Les eaux de classe orange sont de mauvaise qualité et ont la potentialité de réduire de manière importante le nombre de taxons polluosensibles, avec une réduction de la diversité. La note IBGN est entre 5 et 8.

Rouge (Très Mauvaise) :

Les eaux de classe rouge sont de très mauvaise qualité et ont la potentialité de réduire de manière importante le nombre de taxons polluosensibles ou à les supprimer, avec une diversité faible. La note IBGN est ≤ 4 .

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODOLOGIES.

(14 Pages/ 50 - 63.p)

1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE:

La région Sikasso possède un sous-sol très riche en minerais (lithium, or, aluminium, nickel et diamant). En plus des mines industrielles, l'exploitation minière artisanale (Orpillage) est fortement pratiquée dans cette région.

Le décret N°09-318 26 Juin 2009/P-RM stipule que tous projets d'exploitation minière avec une capacité de production supérieure à 100 tonnes par jour, de dragage ou curage de cours ou d'étendues d'eau sont classés catégorie A, et les projets d'exploitation minière avec une capacité de production inférieure à 100 t sont classés catégorie B. Les projets de catégories A et B sont tous assujettis à une étude d'impact environnemental et social (EIES) (MEA, 2008). L'orpillage bien qu'ayant une production journalière inférieure à 100 t par jour et classée dans la catégorie B, ne fait l'objet d'aucune étude préalable avant le démarrage des activités.

Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué plusieurs visites sur quelques sites d'orpillage dans le Haut Bani Niger (HBN) correspond aux bassins supérieurs maliens du Niger et de la branche principale du Bani, le Bagoé. La frontière nationale avec la Côte d'Ivoire marque sa limite sud-est tandis qu'à l'ouest, elle s'arrête à la frontière nationale avec la Guinée.

Les principaux cours d'eau étudiés sont : la rivière Bagoé, la rivière Wassoulou balé, la rivière Kobra babla et le ruisseau Bla, tous situés non loin des sites d'orpillages.

1.1. Site d'orpillage de Massiogocoro:

Le site d'orpillage de Massiogocoro se situe dans le cercle de Kadiolo dans la commune de Misseni (10°17'39" Nord, 06°11'37.9" Ouest) en amont de la rivière Bagoé qui constitue la frontière avec la Côte d'Ivoire.

A Massiogocoro le gisement exploité est de type alluvionnaire, éluvionnaire et le traitement se fait par la technique de la concentration gravitaire (batée, l'écluse) et ou l'amalgamation. Les dragues à succions sont aussi fortement utilisées dans le lit de la rivière Bagoé.

1.2. Site d'orpillage de Massiogocoura:

Le site d'orpillage de Massiogocoura se situe (10°20'50.4" Nord, 06°09'23.5" Ouest) dans le cercle de Kadiolo dans la commune de Misseni à une dizaine de kilomètre en amont du site d'orpillage de Massiogocoro tous 2 situés à une distance moyenne le long de la rivière Bagoé. Le gisement exploité est de type alluvionnaire, éluvionnaire et le traitement par la technique de la concentration gravitaire (batée, l'écluse) et ou l'amalgamation. Les dragues à succions sont également fortement utilisées toujours dans le lit de la même rivière Bagoé.

1.3. Site d'orpaillage d'Alihamdoulilae:

Le site d'orpaillage d'Alihamdoulilae se situe entre le 10°33'11.9" Nord, 06°12'07.4" Ouest dans le cercle de Kadiolo toujours le long de la rivière Bagoé en aval du site de Massiogocoro et Massiogocoura.

L'exploitation porte sur les gisements de type oxydé dans des placers alluvionnaires, éluvionnaire et le traitement se fait également par la technique de la concentration gravitaire (batée, l'écluse) et ou l'amalgamation. Les dragues à succions sont également utilisées dans le lit de la rivière Bagoé.

1.4. Site d'orpaillage de Rourou:

Le site d'orpaillage de Rourou se situe dans le cercle de Yanfolila 11°07'57.9" Nord, 08°08'46.9" Ouest, en amont de la rivière Wassoulou balé qui est un effluent du lac Sankarani l'un des principaux cours d'eau de la région de Sikasso.

L'exploitation est portée sur les gisements réfractaires (veines ou filons) et le traitement se fait par amalgamation et la cyanuration.

1.5. Site d'orpaillage de Kalako:

Le site d'orpaillage de Kalako se situe (10°49'32.6" Nord, 08°07'57.1" Ouest) dans le cercle de Yanfolila dans la commune de Kalana, également en amont de la rivière Wassoulou balé.

Le gisement exploité est de type oxydé (éluvionnaire) le long du cours d'eau et le traitement par concentration gravitaire (batée, écluse) et ou par amalgamation.

On note également la présence de plusieurs cracheurs mobiles de fabrication artisanale.

1.6. Site d'orpaillage de Farabacoura:

Le site d'orpaillage de Farabacoura se situe entre le 11°34'22.9" Nord, 08°15'40.6" Ouest, dans la ville de Selingué à 111 m du ruisseau « Kobla-babla » qui l'un des effluents du lac Sankarani.

L'exploitation aurifère porte sur les gisements oxydés éluvionnaires et le traitement se fait par concentration gravitaire (batée et écluse), par amalgamation et la cyanuration y est fortement pratiquée.

1.7. Site d'orpaillage de Garalo:

Portant le nom de la commune de Garalo, le site d'orpaillage de Garalo se situe entre le 11°00'0" Nord, 07°26'00" Ouest dans le cercle de Bougouni à une distance de 1680 m du ruisseau dénommé « Bla », qui est l'un des effluents de la rivière Baoulé dans la région de

Sikasso. L'exploitation aurifère porte les gisements réfractaires (veines ou filons) et le traitement par amalgamation et la cyanuration.

1.8. Site d'orpaillage de Niougoni:

Le site de Niougoni de coordonnées géographiques 10°14'03.6 " Nord et 6°12'19.2" Ouest, se situe à l'extrême nord de la Côte d'Ivoire dans la sous-préfecture de Tengréla.

Autre fois l'orpaillage y était fortement pratiqué, jusqu'à mise en œuvre du programme national de rationalisation de l'orpaillage (PNRO) du gouvernement ivoirien qui a abouti par la fermeture de 228 sites d'orpaillage clandestins lors d'une vaste opération dénommée ORPI 4 qui s'est déroulée du 13 au 17 septembre 2017.

Aujourd'hui l'orpaillage n'est plus pratiqué sur le site de Niougoni, même si d'autres sites d'orpaillage et mine industrielle existent toujours en amont.

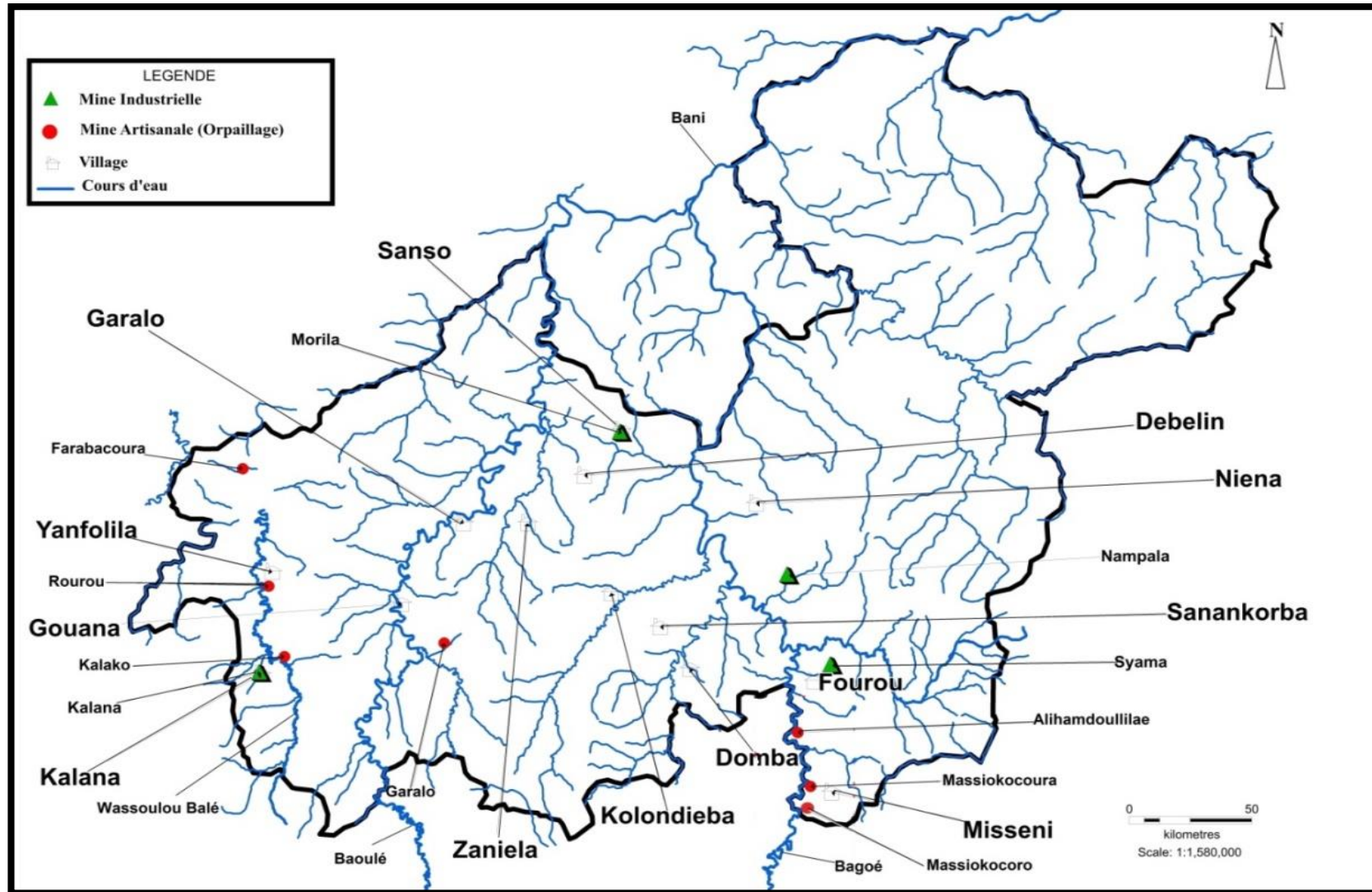


Figure 20: Carte modifiée de la zone d'étude (Traoré, 2018).

2. MATERIEL ET METHODOLOGIES:

Les sites d'orpaillage étudiés ont été choisis sur la base d'un certain nombre de critères qui sont :

- La proximité par rapport à un cours d'eau ;
- Le type de minerai exploité (oxydé ou réfractaire) ;
- Les techniques de traitement utilisées pour la récupération de l'or ;
- L'accessibilité et la situation sécuritaire des sites.

Ainsi en vue d'atteindre nos objectifs nous avons fait recours à plusieurs équipements et outils d'analyses de données qui sont :

- Un appareil photo numérique « Canon zoom 40x »,
- Un GPS « Garmin » ;
- Un stéréomicroscope « Motic »
- Logiciel de cartographie Mapinfo
- Matrice de Fecteau ;
- Les guides d'identification de macroinvertébrés benthiques.
- L'analyse des eaux des paramètres physico-chimiques (in situ) ont été réalisés par un appareil multiparamètre de terrain (AQUAread)
- L'analyse des paramètres physico-chimiques réalisés par le laboratoire SGS Mali ont appliqué les méthodes suivantes :
 - Apha 5210b, 22nd édition
 - Apha ed 21th2005, 4500
 - Apha 2540b, 22nd édition
 - Apha4500clg
 - Apha3120b, 22nd édition
 - Epa200.8
 - Apha ed 22nd 2011, 4500
 - Apha450cnce, 22nd édition
 - Apha2130, 22dn édition
 - Apha4500og, 22nd édition

2.1. Evaluation des risques liés aux activités d'orpaillage:

L'évaluation des risques professionnels est une approche structurée qui consiste à identifier, évaluer, classer, hiérarchiser les risques en vue de mettre en place des actions de prévention pertinentes (**Rufin, 2013**).

Pour avoir des informations et mieux cerner les différentes phases (exploration, construction, exploitation) de l’orpaillage, nous avons visité les zones de travail et échanges (questions, réponses) avec parties prenantes (orpailleurs en opération, Tombolomas, population locale, autorité locale). Les informations recueillies suite aux différentes interviews, nous ont permis d’identifier, d’évaluer et d’hierarchiser les dangers et risques liés aux activités d’orpaillage, de les évaluer et hierarchiser par ordre de gravité.

A l’aide d’un appareil photo numérique « Canon 40X », nous avons pris quelques clichés pour notre rapport final. Les coordonnées géographiques des sites d’orpaillage ainsi que celles des cours d’eau proches ont été relevées à l’aide du GPS « Garmin » afin de réaliser une carte géographique en servant du logiciel de cartographie Mapinfo 12.0.

2.1.1. Identification des risques:

L’identification des risques consiste à repérer les risques auxquels peuvent être exposés les travailleurs dans chacune des étapes des activités (**Rufin, 2013**).

La visite et les échanges avec les parties prenantes nous ont permis d’identifier les risques et dangers que pourraient engendrer les activités d’orpaillage sur l’environnement biophysique (eau, sol, air, faune et flore) et sur l’environnement humain (socio-culturel et économique).

Les informations collectées ont été analysées par une matrice descriptive (**Kouakou, 2015**).

Tableau 15:Matrice descriptive.
(X= Aspect environnemental considéré).

ACTIVITES	IMPACT	MILIEU RECEPTEUR							
		Milieu physique					Milieu humain		
		Sol	Air	Faune	Flore	Eau	Santé	Sécurité	Economie
			X						

2.1.2. Evaluation des risques:

Les risques identifiés et analysés avec la matrice descriptive ont été ensuite évalués à l’aide de la matrice de Fecteau, basée sur 04 critères (l’intensité, la durée, la portée, la qualité) et à chaque critère est assigné un degré d’importance des impacts (Mineur, Moyen, Majeur).

Tableau 16:Matrice de Martin Fecteau.

IMPORTANCE	CRITERE			
	Intensité	Portée	Durée	Qualité
Mineur				
Modérée				
Majeur				

Tableau 17:Cotation de l'importance des impacts.

IMPORTANCE	DESCRIPTION
Mineur (1)	Dommages observés sans toutefois perturbés les milieux récepteurs.
Modérée (2)	Dommages réparables sur les systèmes écologiques.
Majeur (3)	Dommages irréparables sur les systèmes écologiques.

Tableau 18:Critères d'évaluation des impacts.

CRITÈRES	CATEGORIES	DESCRIPTION
Intensité des impacts	Faible (1)	Effets mineurs n'affectant pas les fonctions naturelles de l'écosystème ou impact légèrement positif ou négatif sur les conditions socio-économiques de base.
	Moyenne (2)	Altération négative modérée des fonctions naturelles de l'écosystème ou impact modérément les conditions socio-économiques de base.
	Forte (3)	Altération importantes des fonctions naturelles de l'écosystème ou impact considérablement positif ou négatif sur les conditions socio-économiques de base
Portée des impacts	Ponctuelle (1)	Au niveau du site d'exploitation
	Locale (2)	A moins de 10Km du site d'exploitation
	Régionale (3)	A plus de 10Km du site d'exploitation
Durée des impacts	Courte (1)	Inferieur a un (01) an
	Moyenne (2)	Entre 1 à 10 ans
	Longue (3)	Supérieur à 10 ans
Qualité	Positive (+)	Impacts positivement le milieu récepteur
	Negative (-)	Impact négativement le milieu récepteur

2.1.3. Hiérarchisation des impacts:

Les impacts identifiés, analysés et évalués ont été ensuite hiérarchisés par ordre d'urgence (prioritaire, secondaire, finale et négligeable) qui est calculé par la formule suivante :

$$U = i \times p \times d \times I \times Q.$$

U= Ordre d'urgence

i = Intensité

p = Portée

d = Durée

I = Importance

Q = Qualité

2.2. Evaluation de la qualité écologique des cours d'eau:

La qualité d'une eau est caractérisée par les substances qu'elle contient, la quantité et l'effet que ces substances ont sur l'écosystème et sur l'être humain (**Hebert et Legare ; 2000**).

L'intégrité écologique d'un cours d'eau est déterminée par la combinaison de son degré d'intégrité chimique, physique et biologique (**DCE, 2004**), la dégradation d'une ou plusieurs de ces composantes se manifeste généralement dans la biocénose (**MDDELCC, 2011**).

L'ensemble des cours d'eau étudiés ont été choisis sur la base d'un certain nombre de critères à savoir :

- La proximité par rapport à un site d'orpaillage ;
- Le type de gisement exploité (oxydé ou réfractaire) ;
- Les techniques de traitement utilisées pour la récupération de l'or ;
- L'accessibilité et la situation sécuritaire de la zone.

Au cours de cette étude, nous avons échantillonné les macroinvertébrés benthiques durant la première année (2016) au niveau de 4 cours d'eau en zone d'orpaillage dans la région de Sikasso (Bagoé, Wassoulou balé, Kobla babla et Bla) et par la suite au cours de la deuxième et troisième année d'étude (2017 et 2018) nous avons continué l'échantillonnage uniquement au sein de la rivière Bagoé et cela pour sa richesse spécifique plus abondante que celle des trois autres cours d'eau (Wassoulou balé, Kobla babla et Bla) étudiés en 2016.

2.2.1. Protocole d'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques:

Nous avons effectué l'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques au sein des cours d'eau de la manière suivante :

Munis d'une combinaison imperméable, d'un gilet de sauvetage et d'un filet de type Haveneau (40x15 cm ; 400µm de mailles) nous avons échantillonné les macroinvertébrés le long des berges des cours d'eau en suivant un transect de 500 m en amont et en aval des sites d'orpillage visités.

Six (06) prises de filet ont été effectuées sur chaque transect de façon aléatoire (rive droite et gauche) pour un total de 24 coups de filets dans le sens opposé de l'écoulement des eaux.

Les habitats échantillonnés le long du transect étaient composés de macrophytes émergés, des substrats sableux et sableux argileux, ainsi que les débris ligneux.

Le contenu du filet était trié à l'aide d'un tamis de 400µm de mailles et les espèces récoltées ont été conservées dans des flacons en plastiques de 1 litre (L), contenant de l'alcool dilué à 70%. Les flacons étaient ensuite rangés dans une glacière et amenés au laboratoire de la mine d'or de Syama.

Les échantillons ont été identifiés et dénombrés par classe, ordre et famille à l'aide d'un stéréomicroscope « Motic (10X-30X) » et des guides d'identification des macroinvertébrés benthiques « Guide d'identification du principaux macroinvertébrés benthiques d'eau douce du Québec 2010 » et « MI-KEY, 2010 ».

Certaines données par rapport à l'hydro-morphologie des stations d'échantillonnage ont été mesurées à l'aide d'un ruban gradué, il s'agit de la profondeur moyenne, la largeur moyenne ; et le pourcentage de recouvrement végétal à travers une estimation visuelle de l'ombrage sur le cours d'eau.

Les paramètres physico-chimiques des eaux (in situ) tels que la température (T°C) ; le Potentiel d'hydrogène (pH) et la turbidité ont été directement relevés à l'aide d'un appareil multiparamètre « AQUAread Motic ».

2.2.2. Protocole d'échantillonnage de l'eau:

Une fois l'échantillonnage des macroinvertébrés fini, un prélèvement d'eau était effectué afin de déterminer la composition physico-chimique du milieu de vie des bioindicateurs de qualité et cela en zone d'orpillage ainsi qu'en zone neutre.

Pour ce faire, nous avons utilisé deux (02) bouteilles en plastique fournies par le laboratoire d'analyse SGS Bamako. Il s'agit de :

- Une bouteille claire de 1 litre pour l'analyse des paramètres suivants : Turbidité, Oxygène dissous (OD), Potentiel d'hydrogène (pH), Demande biologique en oxygène (DBO₅), Demande chimique en oxygène (DCO), Nitrate (NO₃), Nitrite (NO₂), Phosphore total (P), Mercure (Hg), Zinc (Zn), Sulfate(SO₄), Cuivre (Cu), Cadmium (Cd), Chrome (Cr).
- Une bouteille de 500 ml conservée à l'hydroxyde de sodium (NaOH) pour l'analyse du cyanure totale (CN).

À l'aide d'une pirogue, nous nous sommes déplacés vers le milieu du cours d'eau à échantillonner, les prélèvements étaient effectués dans le sens opposé de l'écoulement à une profondeur de 4 cm et des gants chirurgicaux étaient portés pour éviter toute contamination.

Les bouteilles (1 litre) étaient rincées trois (03) fois avec l'eau du même cours d'eau avant d'être remplies, et les bouteilles noires de 500 mL (conservées au NaOH) étaient remplies directement sans rinçage à l'aide d'un bécher. Les bouteilles remplies sont bien fermées et étiquetées à l'aide d'un marqueur (date, heure, nom de la station), avant d'être rangées dans une glacière contenant des poches de glaces afin de maintenir la température à 4 °C puis acheminées au laboratoire SGS Lab. Bamako pour l'analyse des paramètres physico-chimiques mentionnés ci-dessus par différentes méthodes en fonction des paramètres (**voir annexe 2**).

2.2.3. Analyse des données:

Les résultats (physico-chimiques et biologiques) issus des échantillonnages réalisés au niveau des cours d'eau en zone d'orpaillage ont été comparés à certaines normes de références (DCE, 2004 ; Hilsenhoff, 1987) mais aussi aux résultats issus de l'échantillonnage du site de référence en zone neutre (Niougoni).

2.2.3.1. Paramètres physico-chimiques:

La DCE classe l'état écologique des cours d'eau en cinq (05) grandes catégories et à chacune d'elle correspond une couleur spécifique il s'agit : Des cours d'eau en très bon état « Bleu » ; bon état « Vert » ; Moyen « Jaune » ; Médiocre « Orange » ; Mauvais « Rouge ».

Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques obtenues après analyse du laboratoire SGS Lab. Bamako ont été comparées aux normes de références de la DCE et représentées sur des graphes réalisés sur Excel.

Une analyse canonique de correspondance (ACC) a été réalisée à partir des données mésologiques (paramètres physico-chimiques) et les données faunistiques (famille de macroinvertébrés supérieur ou égale à 3 individus) afin de déterminer les corrélations existantes entre les deux paramètres.

2.2.3.2. Indices biotiques:

Les données faunistiques collectées nous ont permis de calculer certains indices biotiques par rapport à la composition structurelle des macroinvertébrés benthiques et certains indices de qualité des cours d'eau (IBGN et l'indice d'Hilsenhoff) et qui ont été comparés ensuite aux de références de ces mêmes indices représentés par des graphes sur Excel.

- **Richesse spécifique (S):**

La richesse totale S est le nombre total des espèces que comporte un peuplement considéré dans un écosystème donné (**Ramade, 1984 ; Louadi *et al.*, 2010**).

Nous avons calculé la richesse familiale pour l'ensemble des cours d'eau échantillonnés en zones d'orpaillage et neutre (site de Niougoni).

- **Fréquence d'occurrence:**

La constance désigne en écologie le degré de fréquence avec lequel une espèce d'une biocénose donnée se rencontre dans les échantillons de cette dernière (**Ramade, 2008**). La constance, appelée aussi fréquence d'apparition ou fréquence d'occurrence est calculée par le rapport du nombre de relevés contenant taxon étudié (ni) au nombre total de relevés (N) effectués, exprimée en pourcentage (**Dajoz, 2006**).

La fréquence d'occurrence a été calculée pour l'ensemble des familles de macroinvertébrés échantillonnées dans la rivière Bagoé en zones d'orpaillage et neutre par la formule suivante :

$$F = \frac{ni}{N} \times 100$$

F= fréquence d'occurrence d'un taxon

ni = nombre de relevé contenant le taxon i

N= nombre total de relevés.

On distingue 3 statuts différents: les espèces constantes ($F \geq 50\%$), les espèces accessoires ($25\% < F < 50\%$) et les espèces accidentelles ($F \leq 25\%$) (**Dajoz, 1985**).

- **Indice de diversité de Shannon Weaver (H')**

L'indice de Shannon Weaver (H') est une mesure de diversité spécifique couramment employée en relation avec les fréquences relatives des différentes espèces d'un échantillon.

H' = 0 si le peuplement est dominé par un seul taxon à log₂ S lorsque tous les taxons ont même abondance (**Hadi, 2017**).

L'indice de diversité Shannon est exprimé en bits par individu (**Pielou, 1977**) et permet d'indiquer une structure stable et équilibrée de l'habitat à des valeurs proches de 3, tandis que des valeurs inférieures à 1 traduisent une dégradation et une pollution de la structure de l'habitat (**Türkmen et Kazanci, 2010**).

Nous avons calculé l'indice de Shannon (H') qui est obtenu par la formule suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i.$$

H' = Indice de Shannon Weaver.

Pi = Abondance relative du taxon i avec $P_i = \frac{n_i}{N}$

- **Indice d'équitabilité de Pielou (J)**

L'indice de Pielou (J) est le rapport entre l'indice de diversité réelle (H') et la diversité maximum théorique (Hmax), il varie de 0 à 1 et permet de mesurer l'équilibre au sein d'un peuplement.

L'indice est maximal, quand les taxons du peuplement ont des abondances identiques et tend vers 0 quand la quasi-totalité des effectifs est concentrée sur un seul taxon.

Nous avons calculé l'indice de Pielou pour l'ensemble des cours d'eau en zones d'orpaillage et neutre par la formule suivante :

$$J = H' / H_{max}.$$

J = Indice d'équitabilité de Pielou

H' = Indice de Shannon Weaver

H max = log₂ S (Indice de Shannon Weaver)

Un indice d'équitabilité inférieur à 60% caractérise un environnement perturbé (**Hadi, 2017**).

- **Indice de diversité de Simpson (I_{sim}):**

L'échelle s'étend de 0 à 1, où 1 représente le plus faible niveau de biodiversité (**Hadi, 2017**).

Nous avons calculé l'indice de Simpson par la présente formule suivante :

$$I_{sim} = \frac{\sum ni(ni - 1)}{N(N - 1)}$$

ni = nombre d'individus du taxon *i*.

N= nombre total de l'ensemble des taxons.

- **Indice Ephéméroptère, Plécoptère, Trichoptère (E.P.T):**

Cet indice EPT permet d'estimer la qualité d'un cours d'eau à travers l'abondance relative de trois ordres d'insectes très sensibles à la pollution. Un large pourcentage de cet indice indique une eau de bonne qualité.

Nous avons calculé l'indice EPT pour l'ensemble des cours d'eau par la formule suivante :

$$I_{ept} = \frac{\text{Total EPT}}{N} \times 100$$

I_{ept}= Indice Ephéméroptère, Plécoptère, Trichoptère

E= Ephéméroptère

P= Plécoptère

T= Trichoptère

N= Nombre total de l'ensemble des taxons

- **Rapport E.P.T/Chironomidae:**

Le rapport EPT sur les Chironomidae indique l'équilibre de la communauté. Les EPT considérés comme très sensibles à la pollution et les Chironomidae comme tolérante à la pollution (**Plafkin et al 1989**).

- **Indice biotique de famille (IBF):**

Le IBF permet d'estimer la qualité d'un cours d'eau par la présence des différentes familles de macroinvertébrés auxquelles est attribuée une valeur de tolérance à la pollution (**Hilsenhoff, 1988 ; Plafkin et al., 1989 ; Digital Key to Aquatic Insects of North Dakota**).

Cette valeur varie de 0 (pour les organismes très sensibles à la pollution) à 10 (pour les organismes tolérants à la pollution).

L'IBF a été calculé pour l'ensemble des cours d'eau (Bagoé, Wassoulou bale, Kobla-babla, Bla) en zone d'orpaillage et en zone neutre des différents cours d'eau en utilisant la formule suivante:

$$IBF = \frac{\sum Xi * ti}{N}$$

IBF = Indice biotique de famille

Xi = Nombre d'individus dans un taxon i

ti= Valeur de tolérance du taxon i

N= Nombre total d'individus échantillonnés

Le résultat obtenu est ensuite interprété à partir de la table d'évaluation de la qualité de l'eau (**Hilsenhoff, 1987**).

- **Indice biologique globale normalisée (IBGN):**

Nous avons calculé l'IBGN de la rivière Bagoé en zone d'orpaillage artisanale et en zone neutre (site de référence) à travers la formule suivante :

$$IBGN = N^{\circ} \text{ du groupe faunistique indicateur} + (N^{\circ} \text{ de classe de variété} - 1) ; IBGN \leq 20.$$

- **Analyse canonique de correspondance (ACC):**

L'analyse canonique des correspondances (ACC) permet d'analyser la relation entre deux tables de relevées T1 et T2, et d'obtenir une représentation simultanée des sites, des objets, et des variables en deux ou trois dimensions, optimale pour un critère de variance (**Tre Braak, 1986 ; Chessel, 1987**).

Nous avons effectué une ACC à l'aide du logiciel d'analyse statistique (R.4.3.1) des données mésologiques (paramètres physico-chimiques) et les relevés faunistiques (Macroinvertébrés benthiques) des familles ayant une abondance relative supérieure ou égale à 3 individus

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS
(61 Pages/ 72 - 133p).

1. RESULTAT

1.1. Evaluation des risques liés aux activités de l’orpaillage:

1.1.1. Identification et analyse des risques:

L’analyse des données par rapport à l’évaluation des risques liés aux différentes étapes des activités d’orpaillage sur l’environnement biophysique (Sol, Air, Eau, Faune et Flore) et humain (Santé, Sécurité, Économie), nous a donné les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessous 19, 20, 21, 22, et 23.

Tableau 19:Risques liés à la phase d’exploration des activités d’orpaillage.

PHASE D’EXPLORATION									
PHASES	IMPACTS	MILIEUX RECEPTEURS							
		Milieu physique					Milieu humain		
		Sol	Air	Faune	Flore	Eau	Santé	Sécurité	Economie
VOIES D’ACCES AUX SITES	Déforestation	X		X	X				X
	Perte de couverture végétale	X		X	X				
FONÇAGE (PUITS DE SONDAGE)	Pollution visuelle	X		X	X	X			
	Emission de poussière		X	X			X		
	Perte de Couverture végétale	X		X					
DETECTEURS DE METAUX	Emission de poussière		X				X		
	Emission de bruit			X			X		

Tableau 20:Risques liés à la phase d’installation des camps d’orpailleurs.

PHASE D'INSTALLATION									
PHASES	IMPACTS	MILIEUX RECEPTEURS							
		Milieu biophysique					Milieu humain		
		Sol	Air	Faune	Flore	Eau	Santé	Sécurité	Economie
CONSTRUCTION DE MAISONNETTES	Déforestation	X		X	X				X
	Perte de couverture végétale	X		X	X				
	Destruction des habitats			X					
VIE EN COMMUNAUTE	Production de déchets	X		X	X	X	X		
	Prolifération des maladies contagieuses						X		
	Création d'emplois								X

Tableau 21: Risques liés à la phase de fonçage des puits d'extraction.

PHASE DE FONCAGE									
PHASES	IMPACTS	MILIEUX RECEPTEURS							
		Milieu biophysique					Milieu humain		
		Sol	Air	Faune	Flore	Eau	Santé	Sécurité	Economie
CREUSAGE DES Puits DE MINERAI	Perte de couverture végétale	X		X	X			X	
	Emission de poussière		X				X		
	Modification du paysage	X		X				X	
	Déforestation	X		X	X	X			X
POMPAGE D'EAU	Production de fumée des moteurs		X	X			X		
	Déversement d'hydrocarbure	X				X	X		
PRODUCTION DE STERILE	Erosion			X		X			
	Pollution des cours d'eau					X	X		
	Modification du paysage	X		X	X				

Tableau 22: Risques liés aux opérations de dragage des cours d'eau.

PHASE DE DRAGAGE									
PHASES	IMPACTS	MILIEUX RECEPTEURS							
		Milieu biophysique					Milieu humain		
		Sol	Air	Faune	Flore	Eau	Santé	Sécurité	Economie
SUCCIONS DE L'ALLUVION	Morphologie du bassin des cours d'eau			X	X	X		X	
LAVAGE A L'ECLUSE	Pollution des cours d'eau					X	X		X
	Biodiversité aquatique			X	X				X
	Ensablement du lit des cours d'eau			X	X	X		X	

Tableau 23: Risques liés aux traitements des minerais.

PHASE DE TRAITEMENT									
PHASES	IMPACTS	MILIEUX RECEPTEURS							
		Milieu biophysique					Milieu humain		
		Sol	Air	Faune	Flore	Eau	Santé	Sécurité	Economie
LAVAGE A LA BATEE (ALLUVION ET ELUVION)	Perte de couverture Végétale	X		X	X			X	
	Modification du paysage		X				X		
	Dépot de sterile					X			
	Erosion	X				X			
CONCASSAGE ET BROYAGE DES MINERAIS (REFRACTAIRES)	Emission de poussière		X				X		
	Déversement d'hydrocarbure	X				X	X		
	Emission de bruit			X			X		

PHASE DE TRAITEMENT (SUITE)									
PHASES	IMPACTS	MILIEUX RECEPTEURS							
		Milieu biophysique					Milieu humain		
		Sol	Air	Faune	Flore	Eau	Santé	Sécurité	Economie
LAVAGE A L'ECLUSE	Modification du paysage	X				X			
	Dépôt de stérile	X				X			
AMALGAMATION	Emission de vapeur de mercure		X				X		
	Dépôt stérile contenant du mercure	X			X	X	X		
CYANURATION	Dépôt de stérile avec du cyanure	X				X	X		
	Rejet de produits nocifs	X	X	X	X	X	X	X	
	Emission de gaz toxique		X	X	X	X	X		

1.1.2. Evaluation des risques:

Les dangers identifiés au cours des différentes phases des activités d’orpaillage ont été évalués à l’aide de la matrice de Fecteau et qualifiés.

Tableau 24: Evaluation des risques identifiés par la matrice de Fecteau.

EVALUATION DES IMPACTS						
TACHES	DESCRIPTION DE L'IMPACT	INTENSITE	PORTEE	DUREE	IMPORTANCE	QUALITEE
SONDAGE	Défrichage de la zone pour le creusage des puits de sondages.	Moyenne	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Lessivage et érosion du sol vers les cours d'eau.	Forte	Régionale	Moyenne	Majeur	-
	Modification du paysage par les puits d'extraction.	Forte	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Emission de poussière lors du creusage.	Moyenne	Ponctuelle	Courte	Modérée	-
INSTALLATION DU CAMP	Production de déchets (Solide, liquide, dangereux).	Moyenne	Locale	Longue	Majeur	-
	Prolifération des maladies contagieuses due aux conditions d'hygiène.	Moyenne	Locale	Moyenne	Majeur	-
	Création d'emplois.	Mineur	Régionale	Courte	Moyenne	+

EVALUATION DES IMPACTS (SUITE)						
TACHES	DESCRIPTION DE L'IMPACT	INTENSITE	PORTEE	DUREE	IMPORTANCE	QUALITEE
FONCAGE OU MINE	Défrichage de la zone pour le creusage des puits de sondages	Moyenne	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Lessivage et érosion de stérile et sol vers les cours d'eau.	Forte	Régionale	Moyenne	Majeur	-
	Modification du paysage par les puits d'extraction.	Forte	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Emission de poussière lors du creusage.	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineur	-
BROYAGE ET CONCASSAGE	Emission de poussière.	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineur	-
	Emission de bruit par les moulins.	Faible	Ponctuelle	Courte	Mineur	-
	Déversement d'hydrocarbure et pollution des cours d'eau.	Moyenne	Régionale	Moyenne	Majeur	-
LAVAGE A LA BATEE ET L'ECLUSE	Ensablement des cours d'eau par les stériles.	Forte	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Modification du paysage par les trous de lavage.	Forte	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Brulures à l'acide des orpailleurs.	Forte	Ponctuelle	Longue	Majeur	-

EVALUATION DES IMPACTS (SUITE)						
TACHES	DESCRIPTION DE L'IMPACT	INTENSITE	PORTEE	DUREE	IMPORTANCE	QUALITEE
AMALGAMATION	Production de la vapeur de mercure.	Moyenne	Ponctuelle	Courte	Majeur	-
	Inhalation de gaz	Forte	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Lessivage des dépôts stériles avec du mercure vers les cours d'eau.	Forte	Régionale	Longue	Majeur	-
CYANURATION DES STERILES	Coupe abusive d'arbre et défrichage.	Moyenne	Ponctuelle	Longue	Majeur	-
	Lessivage des dépôts stériles contenant du cyanure vers les cours d'eau.	Forte	Régionale	Moyenne	Majeur	-
	Production de vapeur de cyanure.	Moyenne	Ponctuelle	Courte	Majeur	-
	L'importante quantité d'eau pour le processus de cyanuration.	Moyenne	Locale	Moyenne	Modérée	-
	La santé et la sécurité des orpailleurs.	Forte	Ponctuelle	Courte	Majeur	-
EXTRACTION DE L'OR PAR DU ZINC	Lessivage des rejets de produit chimique (acides, cyanure et autres).	Forte	Régionale	Moyenne	Majeur	-
	Infiltration vers les eaux souterraine.	Moyenne	Locale	Mine	Modérée	-
	Brulures à l'acide des orpailleurs.	Forte	Ponctuelle	Longue	Majeur	-

1.2. **Hiérarchisation des impacts:**

Les impacts évalués (voir tableau 24) ont été hiérarchisés par ordre de gravité et de qualité. Les résultats obtenus figurent dans le tableau 25.

Tableau 25:Hiérarchisation des impacts évalués.

IMPACTS	QUALITE DE L'IMPACT (Q)	INTENSITE (i)	PORTEE (p)	DUREE (d)	IMPORTANCE (I)	PRIORITE (P)
POLLUTION DES RESSOURCES EN EAU	-	3	3	2	3	-54 Prioritaire
SANTÉ ET LA SÉCURITÉ	-	3	2	3	3	-54 Prioritaire
SOL	-	3	1	3	3	-27 Secondaire
FAUNE ET FLORE	-	2	1	3	3	-18 Secondaire
POLLUTION DE L'AIR	-	2	1	2	3	-12 Final
ECONOMIQUE	+	1	3	1	1	+3 Negligible

2. DISCUSSIONS:

L'analyse de risques des différentes phases (exploration, Installation, fonçage et traitement) des activités d'orpaillage dans la région de Sikasso, nous a permis de cerner les impacts positifs et négatifs de celle-ci sur les composantes environnementales biophysiques (eau, sol, air, faune et flore), humaine (santé, sécurité et économie) et de les hiérarchiser en fonction de la gravité des impacts.

2.1. Phase d'exploration:

On constate que la phase d'exploration entraîne des impacts négatifs sur la faune et la flore dus à la coupe des arbres (déforestation) y compris les espèces protégées par la loi malienne, pour la création des voies d'accès aux différents sites potentiellement exploitables. Cette déforestation entraîne également une destruction des habitats de la faune présente.

Le bruit des appareils détecteur de métaux utilisés par certains orpailleurs sans aucun équipement de protection (casque auditif, bouchons à oreilles) engendre des bruits pouvant se traduire par une pollution sonore dont une exposition chronique et peut affecter leur santé (problème auditif) et également la migration de la faune.

Aussi des puits et petits trous de sondage réalisés par les orpailleurs peuvent impacter considérablement le sol et entraînent une modification du paysage, accompagné d'une émission importante de poussière pouvant affecter la santé des orpailleurs non moins munis d'aucun équipement de protection individuel (contre poussière), mais aussi les habitations proches de ces sites d'orpaillage.

2.2. Phase d'installation:

L'installation du camp des orpailleurs entraîne des impacts positifs à travers un accroissement des échanges commerciaux donc de l'économie locale, mais elle engendre également des impacts négatifs considérables pour l'environnement biophysique (coupe abusive des arbres pour la construction des maisonnettes en plastiques à titre d'habitat ou de commerce, la migration de la faune), ainsi que pour la communauté locale. Cela est dû à l'arrivée des personnes de tous les horizons, certains à la recherche du métal précieux (Or) et d'autres pour des business (commerce, prostitution etc...).

Les camps d'orpailleurs sont sources de conflit socioculturel, mais aussi un lieu favorable à la prolifération des maladies contagieuses (MST, choléra, paludisme) et aux trafics de stupéfiants.

2.3. Phase d'extraction:

L'extraction du minerai s'effectue soit par fonçage ou par dragage, toutes les 02 méthodes entraînent des impacts négatifs sur les composantes biophysiques (sol, eau, air, faune, flore) et Humain (santé, sécurité, économie).

Les stériles issus du fonçage des puits d'extraction et déposés sont lessivés par les eaux de ruissellement (pluie, pompage de l'eau des puits) vers les cours d'eau proches pouvant entraîner une altération de la composition physico-chimiques et biologiques de ces cours d'eau. Selon la texture du sol (mou) ou du type de gisement exploité (veines), certains puits nécessitent des soutènements qui se font avec des troncs d'arbres impliquant une coupe abusive des arbres y compris les espèces protégées par la loi malienne.

Les opérations de dragages à l'intérieur du lit des cours d'eau entraînent une modification de la morphologie du bassin des cours d'eau, l'ensablement du lit, la contamination des eaux par le déversement d'hydrocarbures (huile et gasoil) des moteurs installés sur les dragues de fabrication artisanale et la mise en danger de la biodiversité aquatique.

Une fois l'extraction finie, les puits sont délaissés causant la mort des animaux qui se retrouvent très souvent piégés à l'intérieur des anciens puits d'extraction minière.

2.4. Phase de traitement:

Bien-que les impacts diffèrent selon les techniques de traitement employées (concentration gravitaire, amalgamation, cyanuration), elles engendrent toutes des impacts négatifs sur les différentes composantes de l'environnement.

La technique de la concentration gravitaire (batée, table d'écluse) utilisées pour le traitement des minerais oxydés produit des tas de stérile pouvant être lessivés par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau. Les déchets de traitement contenant des substances chimiques dangereuses (amalgamation, cyanuration) déposées à l'air libre sont susceptibles d'être lessivées par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau. L'ensemble des techniques utilisées peuvent conduire à une altération des paramètres physico-chimiques et biologiques des cours d'eau.

Les vapeurs de mercure générées par la technique l'amalgamation, dans l'atmosphère inhalées par les orpailleurs qui opèrent sans masque de protection peuvent affecter leur santé et celle de la communauté locale riveraine.

2.5. Hiérarchisation des risques:

L'analyse des résultats issus de la hiérarchisation des impacts identifiés au cours de cette étude, nous indique que les cours d'eau ainsi que la santé et la sécurité des orpailleurs et celle de la communauté locale sont les plus touchés par les activités d'exploitation minière artisanale d'où leur classification comme prioritaires (gravement touchés).

Le sol, la faune et la flore sont également affectés par l'exploitation minière artisanale moyennement et sont classés comme secondaires par rapport aux cours d'eau et à la santé des orpailleurs.

Bien que l'aspect économique présente des impacts positifs, il reste négligeable. Cela est due à une mauvaise organisation de la filière, et une grande partie de l'or produit sont acheminés hors du pays sans redevance douanière donc aucun gain pour l'Etat, même si les élus locaux observent quelques profits et engendrent également une sous-estimation des productions issues de l'exploitation artisanale.

2.6. Conclusion:

Cette étude d'évaluation des risques, nous a permis d'identifier, d'évaluer et d'hiérarchiser les risques liés à l'exploitation minière artisanale.

Cette activité d'orpaillage présente des risques d'impacts négatifs pour l'ensemble des composantes biophysiques particulièrement sur la qualité des cours d'eau et aussi sur les composantes humaines à savoir la santé et la sécurité. Cependant l'orpaillage permet à bon nombre de familles de subvenir à leurs besoins, et crée de l'emploi pour les jeunes donc présente également quelques aspects positifs.

3. EVALUATION DE LA QUALITE ECOLOGIQUE DES COURS D'EAU:

Le calcul des indices écologiques sur les échantillons de macroinvertébrés benthiques collectés au sein des différents cours d'eau (Bagoé, Wassoulou balé, Kobla babla, Bla) proches des sites d'orpaillage et en zone de référence ainsi que l'analyse des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés au sein des mêmes cours d'eau, nous ont permis d'obtenir les résultats suivants et de déterminer l'état de santé de ces cours d'eau par rapport aux activités d'orpaillage.

3.1. **Intégrité biologique:**

3.1.1. **Cours d'eau en zone d'orpillage:**

Les résultats obtenus sont issus de l'échantillonnage réalisé sur les cours d'eau en zone d'orpillage et en zone de neutre (référence) durant la période d'étude de 2016 à 2018.

3.1.1.1. **Résultats courant 2016:**

Ces indices biotiques ont été calculés pour la rivière Bagoé, la rivière Wassoulou balé, la rivière Kobla babla et le ruisseau Bla.

• **Richesse familiale (F):**

Tableau 26: Richesse familiale des cours d'eau proches des sites d'orpillage artisanale.

RICHESSSE FAMILIALE (F)				
Année	Bagoé	Wassoulou balé	Kobla babla	Bla
2016	18	7	1	12

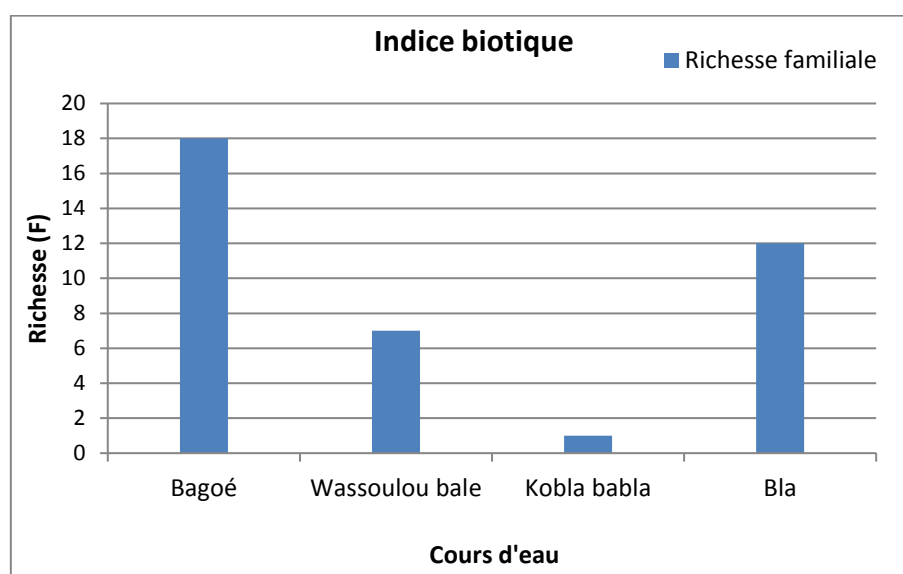


Figure 21: Richesse familiale des cours d'eau proche dans la région de Sikasso.

On note une forte richesse familiale de macroinvertébrés en benthiques dans la rivière Bagoé par rapport aux autres cours d'eau (Wassoulou Balé, Kobla babla, Bla) due à la technique utilisée (concentration gravitaire et l'amalgamation) différente de celle des autres sites.

• **Fréquence d'occurrence:**

Pleidae (**Pl**); Belostomatidae (**Be**); Gerridae (**Ge**); Naucoridae (**Na**); Spheridae (**Sp**); Lymnaeidae (**Ly**); Calopetrygidae (**Ca**); Libellulidae (**Li**); Hydrobiidae (**Hy**); Coenagrionidae (**Co**); Ephemerellidae (**Ep**); Notonectidae (**No**); Molannidae (**Mo**); Pteronarcyidae (**Pt**); Chironomidae (**Ch**); Gammaridae (**Ga**); Cancridae (**Can**); Petaluridae (**Pe**); Unionidae

(Un) ; Elmidae (El) ; Hydrophilidae (Hyd); Lestidae (Les) ; Nepidae (Ne) ; Dispseudodidae (Di) ; Ceratopogonidae (Ce) ; Aeshnidae (Ae) ; Hydropsychidae (Hb) ; Leuctricidae (Leu) ; Nematodidae (Nem) ; Tipulidae (Ti) ; Mesoveliidae (Mes) ; Cambaridae (Cam).

Tableau 27:Fréquence d'occurrence des familles de macroinvertébrés de la rivière Bagoé.

FREQUENCE D'OCCURENCE (F) % DU BAGOE																
Pl	Be	Ge	Na	Sp	Ly	Ca	Li	Hy	Co	Ep	No	Mo	Pt	Ch	Ga	Can
75	50	25	25	100	50	25	100	50	25	25	75	25	25	100	100	25
FREQUENCE D'OCCURENCE (F) % DU BAGOE (SUITE)																
Pe	Un	El	Hyd	Les	Ne	Di	Ce	Ae	Hb	Leu	Nem	Ti	Me	Cam		
75	50	50	50	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

Les familles de macroinvertébrés benthiques constantes dans la rivière Bagoé sont celles des : Chironomidae, Gammaridae, Pleidae, Petaluridae, Notonectidae, Hydrophilidae, Unionidae, Elmidae, Lymnaeidae, Belostomatidae, Hydrobiidae, Spheridae, Libellulidae.

Sont considérées comme accessoires les familles de : Gerridae, Naucoridae, Coenagrionidae, Calopterydae, Molannidae, Pteronarcydae, Cancridae, Lestidae, Nepidae, Dispseudodidae, Ceratopogonidae, Aeshnidae, Hydropsychidae, Leuctricidae, Nematodidae, Tipulidae, Mesoveliidae, Cambaridae.

3.1.1.2. Indice de diversité de Shannon Weaver (H'):

Le calcul de l'indice de Shannon (H') des cours d'eau échantillonnés nous donne les résultats ci-dessous dans le tableau 28.

Tableau 28:Indice de diversité (H') des cours d'eau en zone d'orpaillage.

INDICE DE SHANNON WEAVER (H')				
Année	Bagoé	Wassoulou balé	Kobla babla	Bla
2016	1,91	1,75	0	2,23

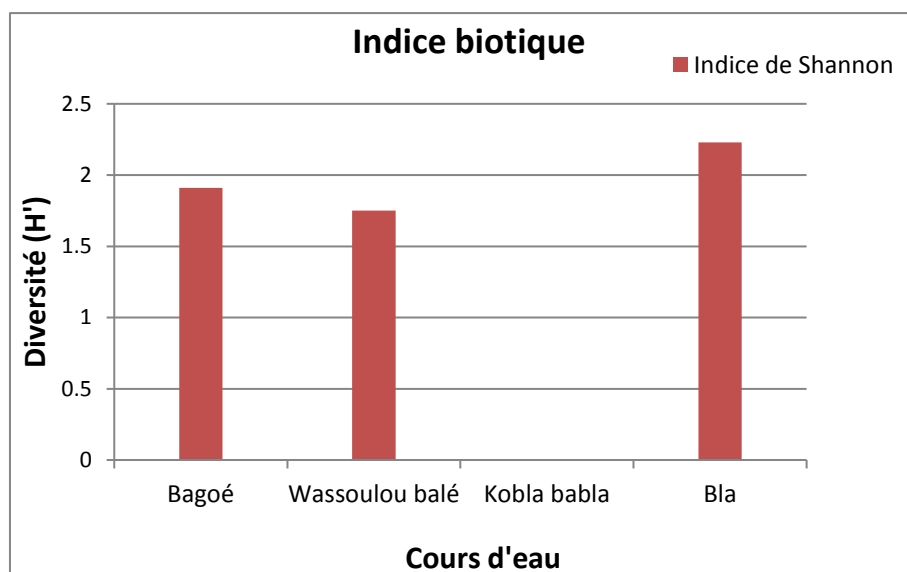


Figure 22:Indice de Shannon Weaver (H') des cours d'eau dans la région de Sikasso.

L'indice de diversité de Shannon Weaver (H') est élevé dans le ruisseau Bla ($H' = 2,23$) du site de Garalo par rapport aux autres cours d'eau étudiés et nul dans la rivière Kobla babla ($H' = 0$) du site de Farabacoura.

Cette différence pourrait s'expliquer par la réduction des activités d'orpillage sur le site Garalo, ainsi que la distance (D) qui sépare le ruisseau du site d'orpillage qui est de :

- D= 1680 m entre le site d'orpillage de Garalo et le ruisseau Bla,
- D = 0 à 10 m entre les sites d'orpillage de Massiogocoro, Massiogocoura, et Alihamdoulilae et la rivière Bagoé,
- D= 153m entre la rivière Wassoulou balé et les sites de Kalako et Rourou
- D= 111 m entre le site de Farabacoura et la rivière Kobla bala.

3.1.1.3. Indice d'équitabilité de Pielou (J):

Le calcul de l'indice de Pielou (J) des cours d'eau échantillonnés nous donne les résultats ci-dessous dans le tableau 29.

Tableau 29:Indice d'équitabilité (J) des cours d'eau en zone d'orpillage .

Indice d'équitabilité de Pielou (J)				
Année	Bagoé	Wassoulou balé	Kobla babla	Bla
2016	0,91	0.84	0	0,90

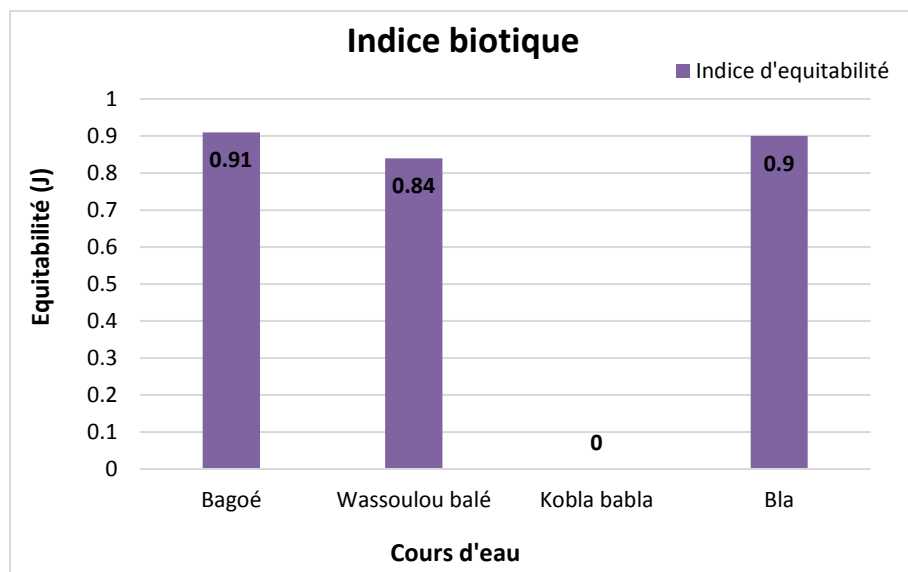


Figure 23:Indice d'équitabilité (J) des cours d'eau en 2016.

L'indice d'équitabilité de Pielou (J), nous montre une diversité de la communauté de macroinvertébrés plus équilibrée dans la rivière Bagoé ($J = 0,91$) que dans les autres cours d'eau notamment Kobla babla ($J=0$), Wassoulou balé ($J = 0,84$), et Bla ($J= 0,90$).

3.1.1.4. Rapport Ephéméroptère, Trichoptère, Plécoptère/Chironomidae (EPT/C):

Le rapport EPT/C afin d'évaluer la qualité biologique des cours d'eau nous indique les résultats notés dans le tableau 30.

Tableau 30:Rapport EPT/C des cours d'eau en zone d'orpaillage.

RAPPORT EPT/C				
Année	Bagoé	Wassoulou balé	Kobla babla	Bla
2016	3	0	0	2

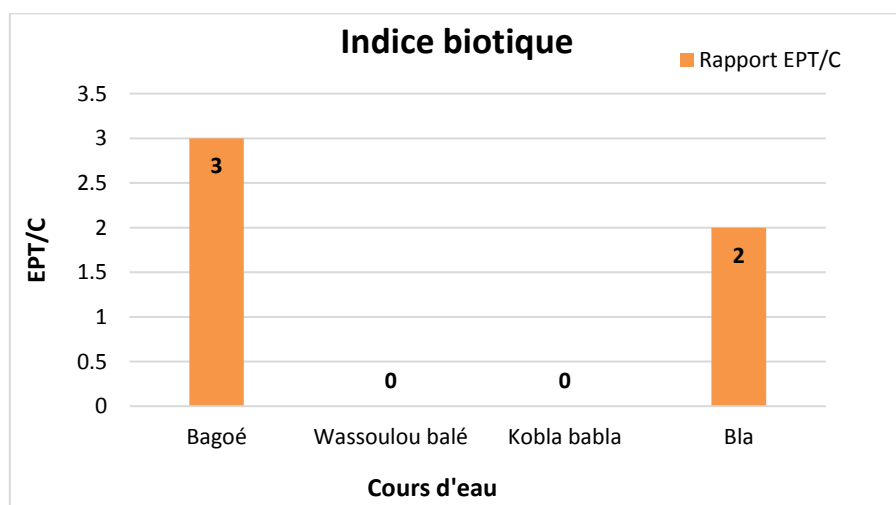


Figure 24:Rapport EPT/C des cours d'eau en 2016.

Le rapport EPT/C est plus grand dans la rivière Bagoé EPT/C= 3 et carrément nul pour la rivière Wassoulou Balé, Kobla babla avec EPT/C=0 et dans le ruisseau Bla EPT/C=2. Cela traduit une meilleure qualité de la rivière Bagoé et du ruisseau Bla par rapport à la rivière Wassoulou balé et celle de Kobla babla.

3.1.1.5. Indice biotique de famille (IBF):

Les résultats issus du calcul de l'indice biotique de famille des 4 cours d'eau sont mentionnés dans le tableau 31.

Tableau 31:Indice biotique de famille (IBF) des cours d'eau en zone d'orpillage.

INDICE BIOTIQUE D'HILSENHOFF 1987				
Année	Bagoé	Wassoulou balé	Kobla babla	Bla
2016	5,78	7,29	8	5,76

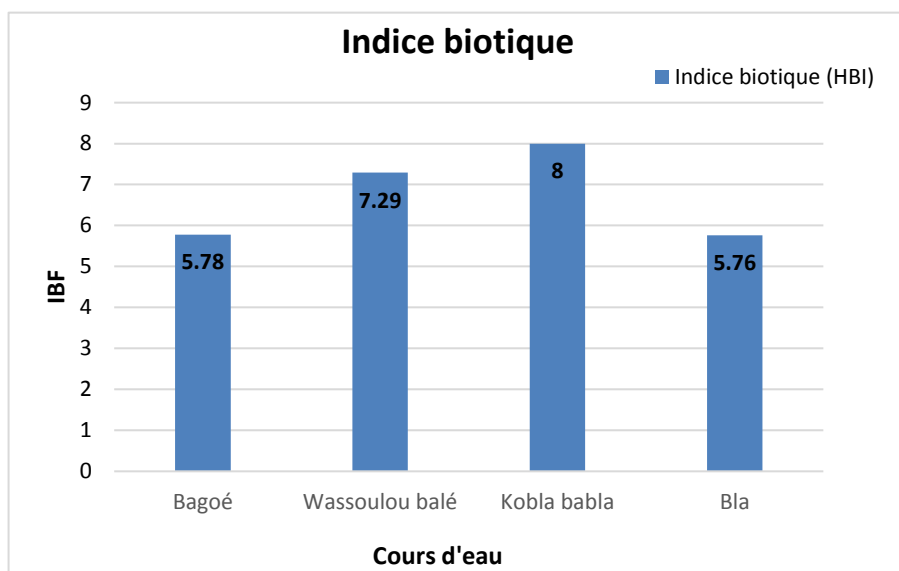


Figure 25:Indice biotique de famille (IBF) des cours d'eau en 2016.

L'IBF du ruisseau Bla est faible (IBF=5.76) par rapport au Bagoé (IBF= 5,78), au Wassoulou balé (IBF = 7,29) et très élevé dans le Kobla bala (IBF =8). Cela indique une fois de plus une meilleure qualité des eaux de la rivière Bagoé et du ruisseau Bla par rapport aux rivières Wassoulou balé et Kobla babla.

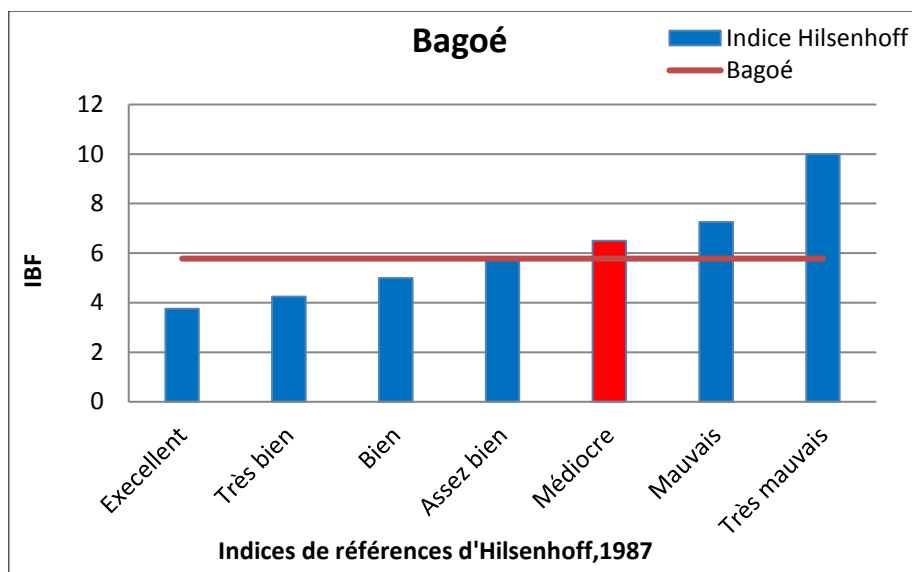


Figure 26:IBF du Bagoé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff .

Comparée à l'indice de référence d'Hilsenhoff, la rivière Bagoé se classe comme une eau de qualité médiocre.

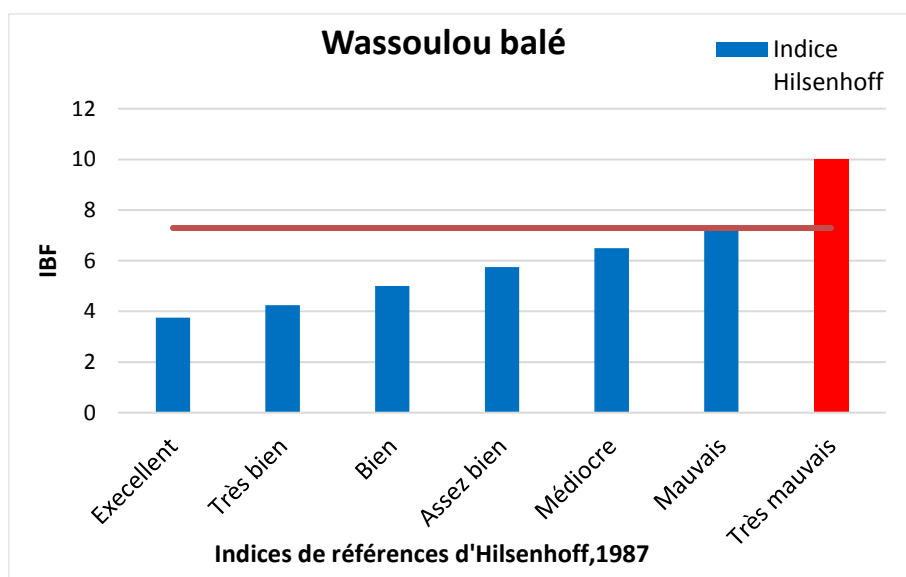


Figure 27:IBF du Wassoulou balé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff .

Comparée à l'indice de référence d'Hilsenhoff, la rivière Wassoulou balé se classe comme une eau de très mauvaise qualité.

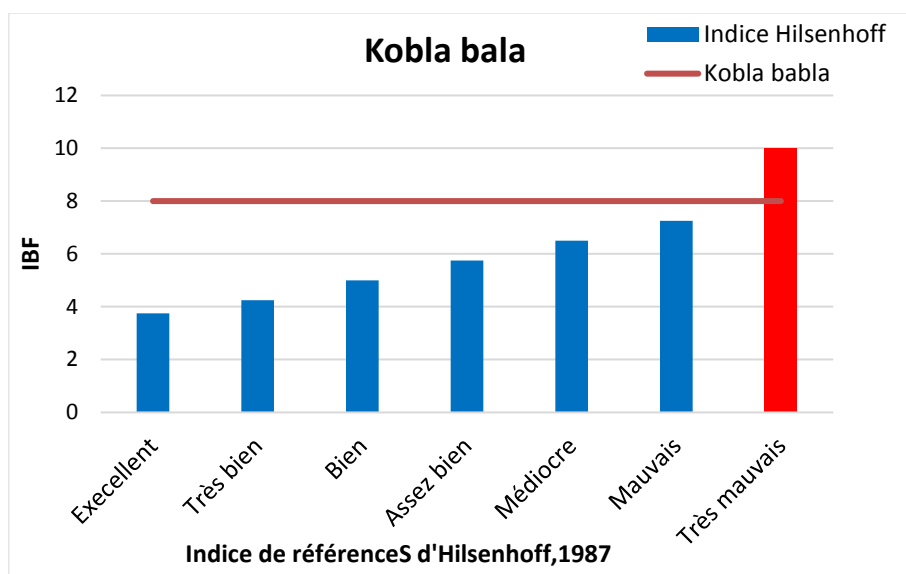


Figure 28:IBF du Kobla babla par rapport aux indices de références d’Hilsenhoff .

Comparée à l’indice de référence d’Hilsenhoff, la rivière Kobla babla se classe comme une eau de très mauvaise qualité.

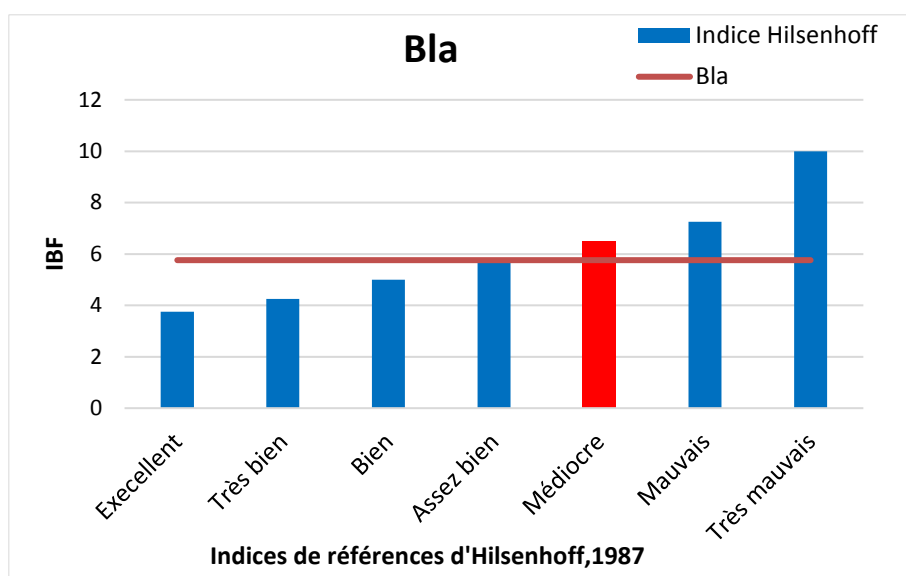


Figure 29:IBF du Bagoé par rapport aux indices de références d’Hilsenhoff..

Comparé à l’indice de référence d’Hilsenhoff, le Bla se classe comme une eau de qualité médiocre.

3.1.2. Résultat année 2017 et 2018:

Les échantillonnages de 2017 et de 2018 ont été réalisés uniquement sur la rivière Bagoé en zone d’orpaillage (site de Massiogocoro, Massiogocoura et Alihamdoulilae) et en zone neutre (site de Niougoni) comme site de référence. Les résultats obtenus sont les suivants:

3.1.2.1. **Richesse familiale (F):**

Tableau 32:Richesse familiale du Bagoé en zone d'orpaillage dans la région de Sikasso.

RICHESSSE FAMILIALE (F)	
Année	Bagoé
2017	12
2018	13

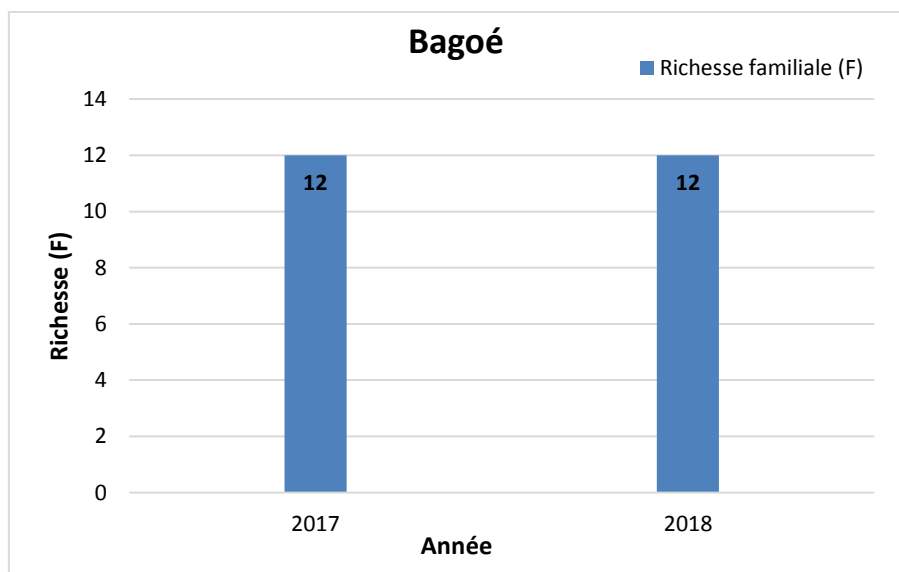


Figure 30:Richesse familiale du Bagoé en zone d'orpaillage (2017, 2018).

La rivière Bagoé présente la plus grande richesse familiale (F) en 2018 F= 13 qu'en 2017 avec F= 12.

3.1.2.2. **Indice de diversité de Shannon Weaver (H'):**

Tableau 33:Indice de diversité (H') du Bagoé en zone d'orpaillage.

INDICE DE SHANNON WEAVER (H')	
Année	Bagoé
2017	2
2018	1,46

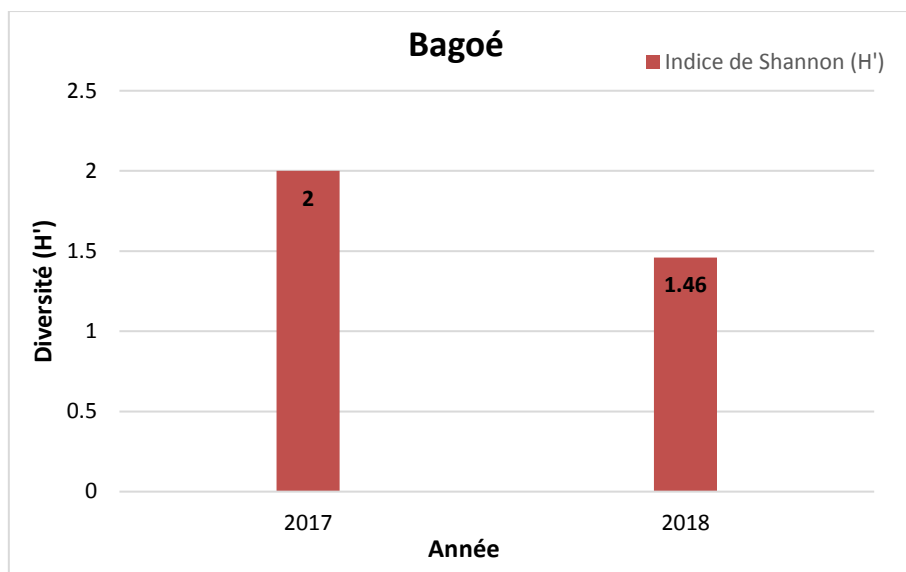


Figure 31: Indice de diversité (H') du Bagoé en dans la région de Sikasso.

L'indice de diversité de Shannon (H') indique une diversité plus homogène en 2017 ($H' = 2$) qu'en 2018 ($H' = 1,46$) du Bagoé en zone d'orpaillage artisanale.

3.1.2.3. Indice d'équitabilité de Pielou (J):

Tableau 34: Indice d'équitabilité (J) du Bagoé en zone d'orpaillage.

INDICE D'EQUITABITE DE PIELOU (J)	
Année	Bagoé
2017	1
2018	0,59

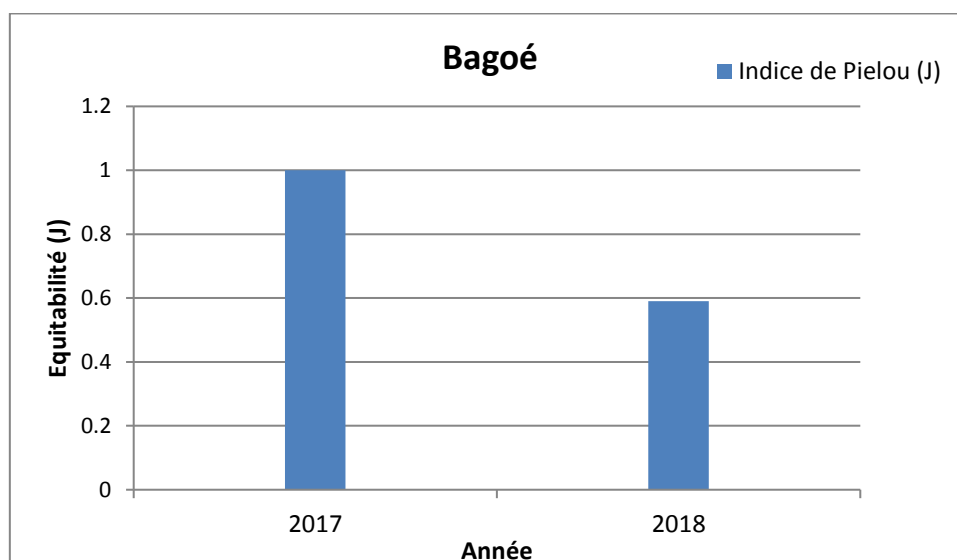


Figure 32: Indice d'équitabilité (J) du Bagoé en Zone d'orpaillage.

L'indice d'équitabilité de Pielou (J) nous montre une diversité familiale de macroinvertébrés plus équilibrée en 2017 ($J = 1$), qu'en 2018 ($J = 0.59$) de la rivière Bagoé en zone d'orpaillage.

3.1.2.4. **Indice biotique de famille (IBF):**

Tableau 35: Indice biotique de famille (IBF) du Bagoé en zone d'orpaillage.

INDICE BIOTIQUE DE FAMILLE (IBF)	
Année	Bagoé
2017	6,01
2018	5,13

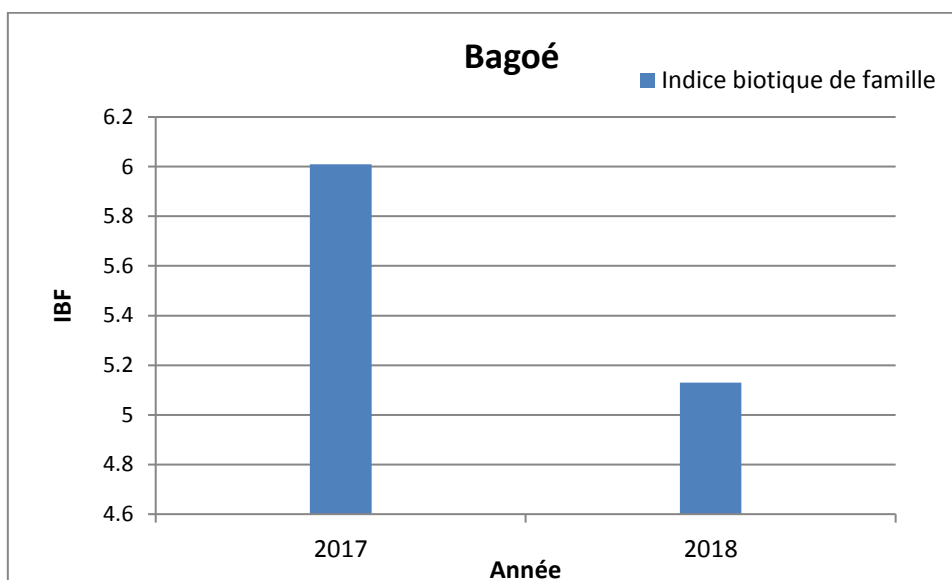


Figure 33: Indice biotique de famille (IBF) du Bagoé (2017, 2018).

L'IBF du Bagoé en zone d'orpaillage est plus élevé en 2017 (IBF = 6,01) qu'en 2018 (IBF = 5,13). Cela note une amélioration de la qualité de la rivière Bagoé en zone d'orpaillage entre 2017 et 2018.

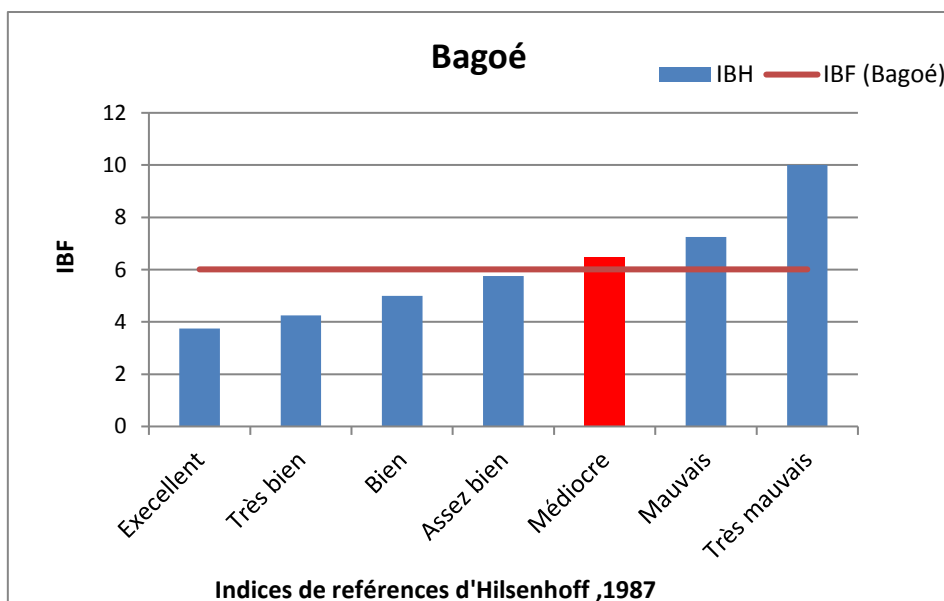


Figure 34: IBF du Bagoé en 2017 par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff.

IBF du Bagoé en 2017 par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff.

Comparée à l'indice de référence d'Hilsenhoff, la rivière Bagoé en 2017 se classe comme une eau de qualité médiocre.

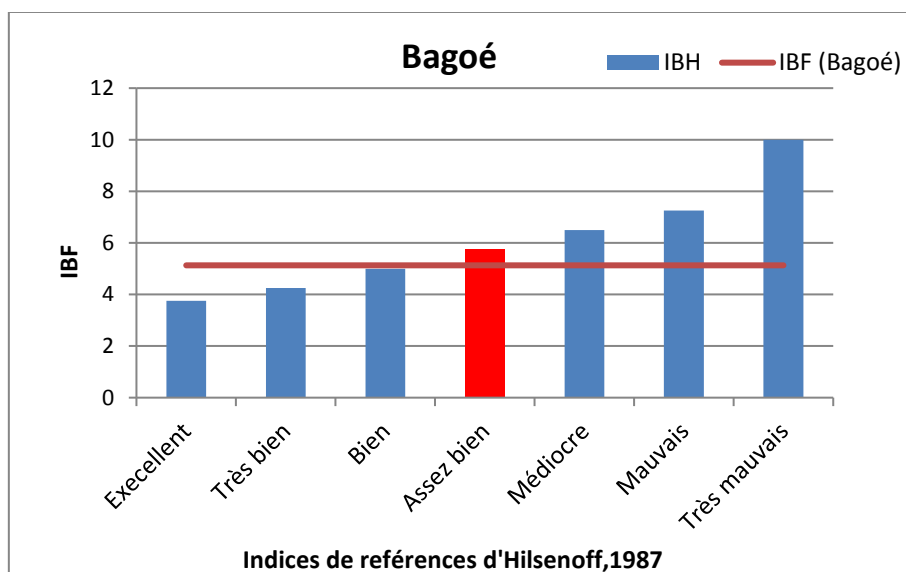


Figure 35:IBF du Bagoé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff.

Comparée à l'indice de référence d'Hilsenhoff, la rivière Bagoé en 2018 se classe comme une eau d'assez bonne qualité.

3.1.3. Bagoé par rapport au site de référence de Niougoni :

3.1.3.1. Richesse familiale (F):

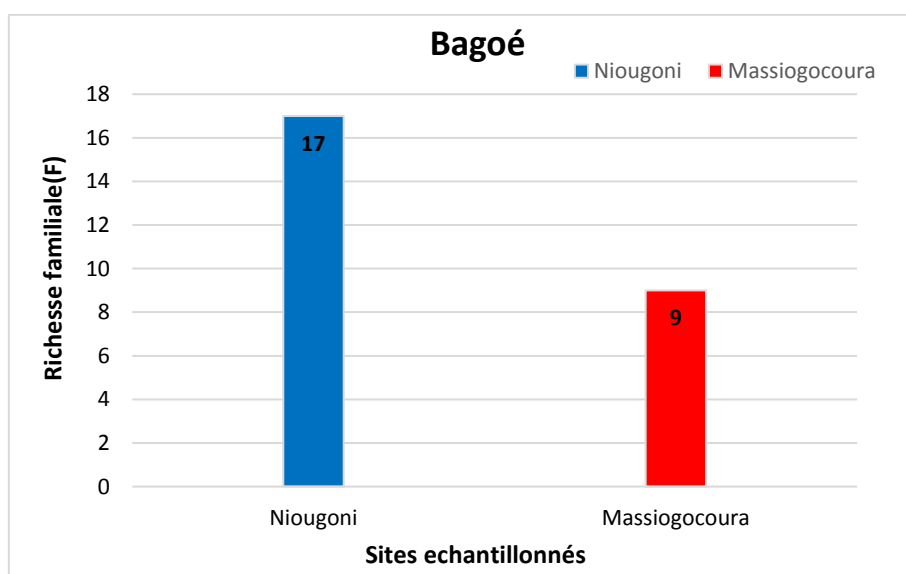


Figure 36:Richesse familiale (F) de la rivière Bagoé.

Comparée à un point de référence (site de Niougoni), la rivière Bagoé en 2018 présente une plus grande richesse familiale ($F=17$) en zone neutre qu'en zone d'orpaillage ($F=9$) sur le site de Massiogocoura.

3.1.3.2. Indice de Shannon Weaver (H'):

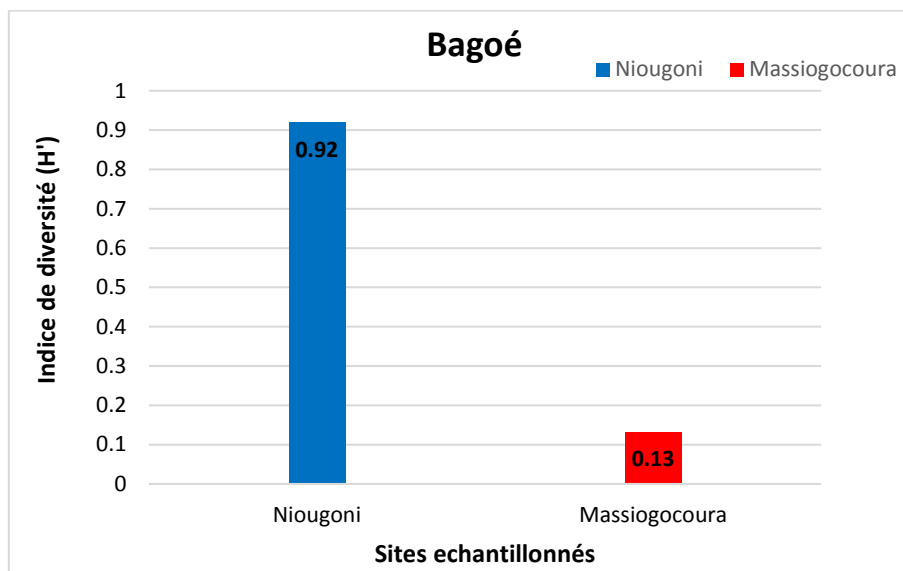


Figure 37:Indice de Shannon Weaver (H') de la rivière Bagoé.

L'indice de Shannon Weaver (H'), nous montre une diversité familiale plus homogène sur le site de Niougoni ($H'=0,92$) par rapport au site de Massiogocoura ($H'=0,13$).

3.1.3.3. Indice d'équitabilité de Pielou (J):

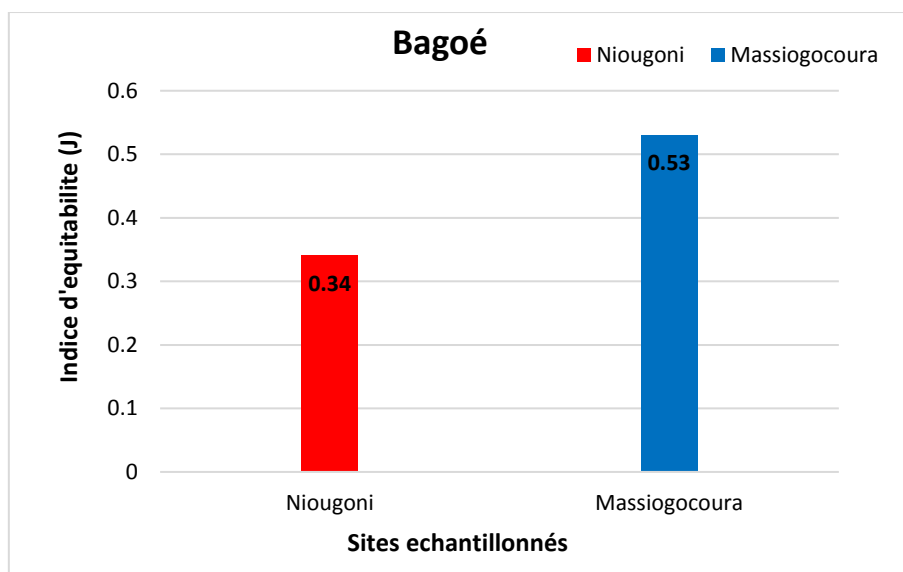


Figure 38:Indice de Shannon Weaver (H') de la rivière Bagoé.

L'indice d'équitabilité de Pielou (J), indique une diversité familiale plus équilibrée sur le site de Massiogocoura (J=0,90) par rapport au site de Niougoni (J= 0,34).

3.1.3.4. Indice de Simpson (Isim):

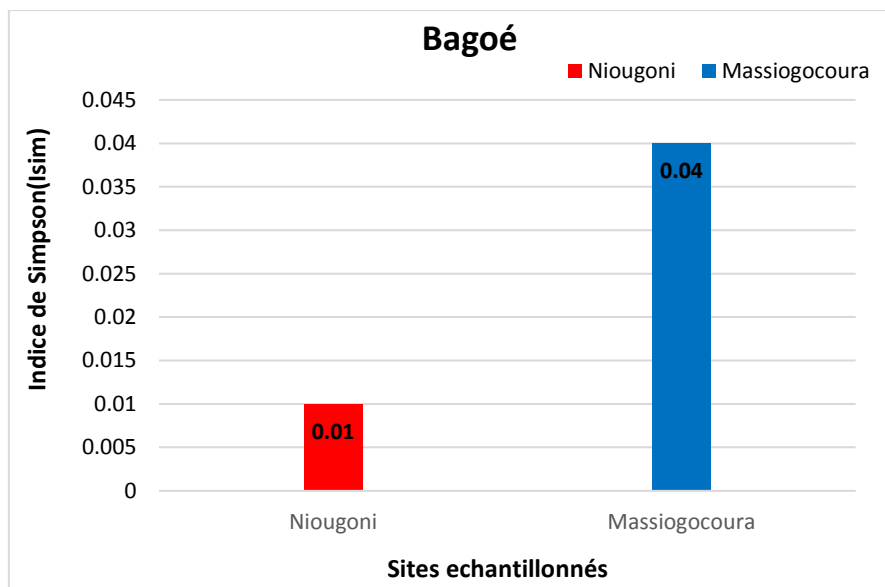


Figure 39:Indice de Simpson (Isim) de la rivière Bagoé.

L'indice de Simpson (Isim), indique une diversité familiale plus homogène sur le site de Niougoni (Isim= 0.01) par rapport au site de Massiogocoura (Isim= 0,0).

3.1.3.5. Rapport EPT/C:

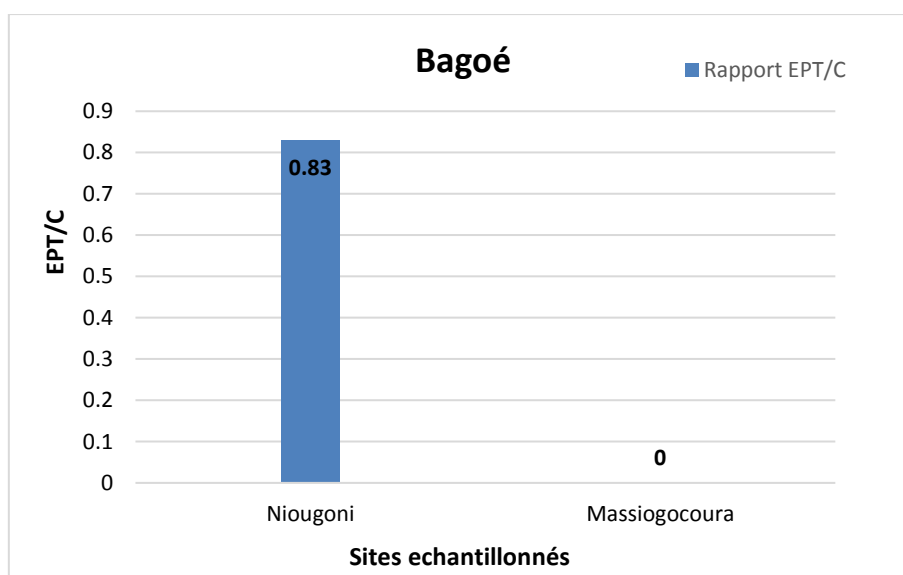


Figure 40:Rapport ETP/C de la rivière Bagoé.

Le rapport EPT/C de la rivière Bagoé en zone site de Niougoni est plus élevé (EPT/C = 0,82) qu'en zone d'orpaillage (EPT/C = 0) sur le site de Massiogocoura. Ce résultat indique une meilleure qualité de la rivière Bagoé en zone neutre (site de Niougoni) qu'en zone d'orpaillage (site de Massiogocoura).

3.1.3.6. Indice biotique de famille (IBF):

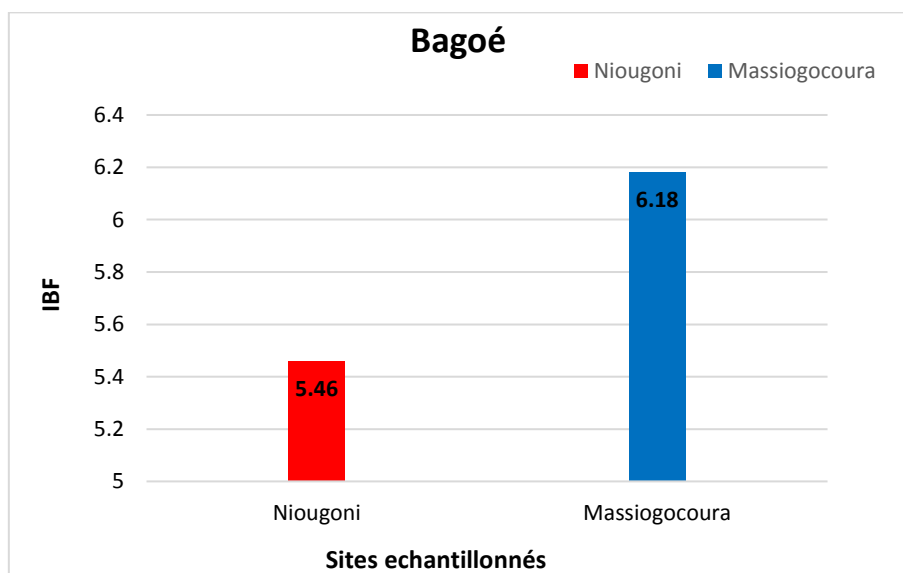


Figure 41:IBF des sites échantillonnés dans le Bagoé.

L'indice biotique de famille (IBF) sur le site Niougoni est plus petit (IBF=5,48) par rapport au site de Massiogocoura (IBF=6,28) désignant une meilleure qualité de la rivière Bagoé en zone neutre qu'en zone d'orpaillage.

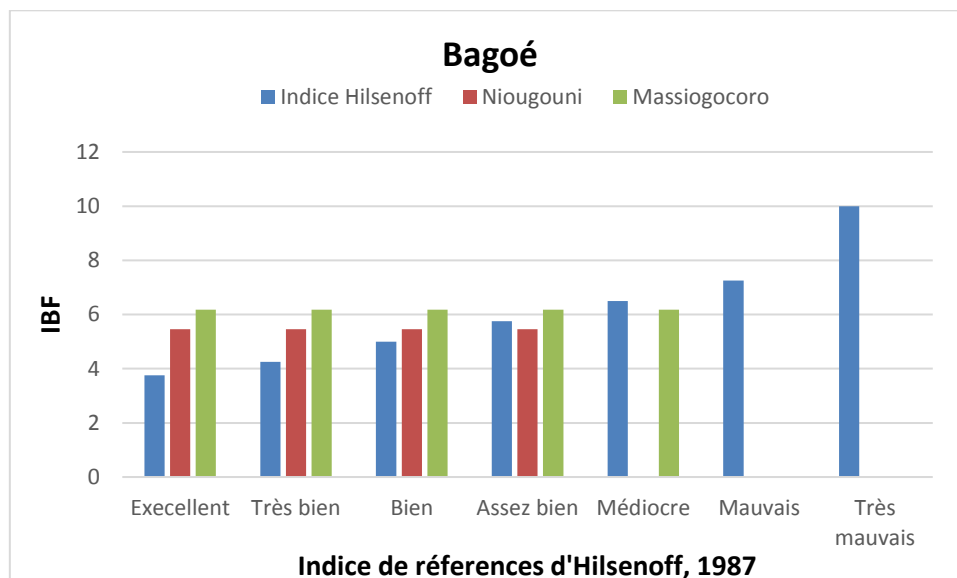


Figure 42:Indice biotique de famille (IBF) de la rivière Bagoé par rapport à Hilsenhoff.

L'IBF de la rivière Bagoé par rapport aux indices de références d'Hilsenhoff indique une eau de qualité assez bonne en zone neutre (site de Niougoni) et de qualité médiocre en zone d'orpaillage (site de Massiogocoura).

3.1.3.7. **Indice biotique globale normalisé (IBGN):**

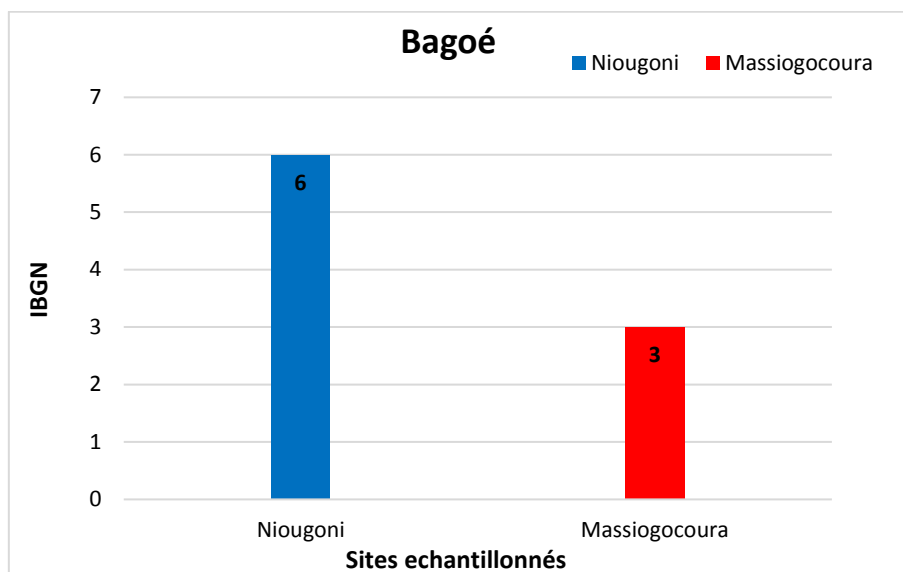


Figure 43: IBGN des sites échantillonnés dans la rivière Bagoé.

L'indice biologique globale normalisée (IBGN) du Bagoé est plus élevé sur le site Niougoni (IBGN= 6) par rapport au site Massiogocoura (IBGN=3).

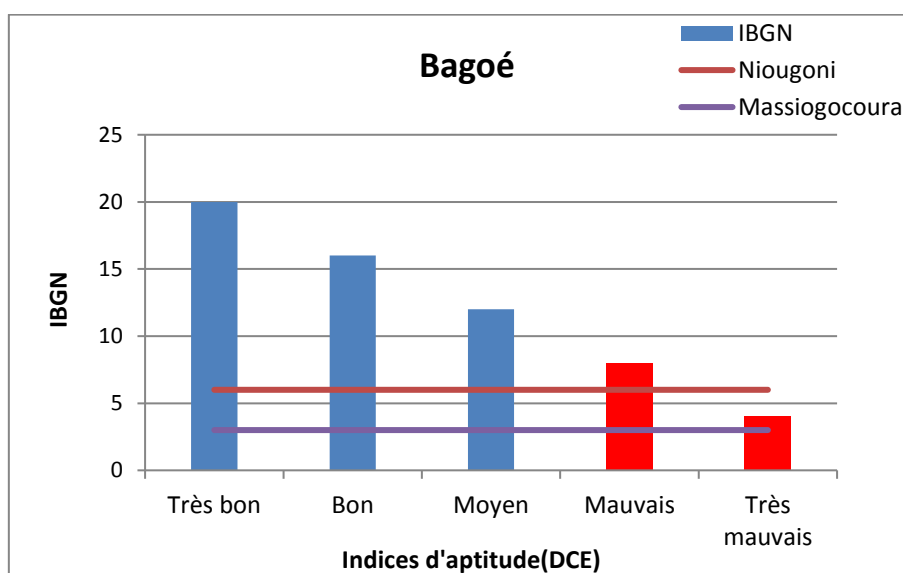


Figure 44: IBGN du Bagoé par rapport aux indices d'aptitude de la DCE.

L'IBGN du Bagoé par rapport aux indices d'aptitudes de la DCE, indique une eau de mauvaise qualité sur le site Niougoni et de très mauvaise qualité sur le site de Massiogocoura.

3.1.3.8. Macroinvertébrés benthiques identifiés:

- La rivière Bagoé :

Tableau 36:Liste des de macroinvertébrés de la rivière Bagoé, 2016.

ANNEE	COURS D'EAU	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	NOMBRE
2016	Rivière Bagoé	Insecte	Hémiptère	Pleidae	3
		Insecte	Hémiptère	Belostomidae	1
		Insecte	Hémiptère	Gerridae	1
		Insecte	Hémiptère	Naucoridae	1
		Bivalve	Venorida	Sphaeriidae	7
		Gastéropode	Basommatophora	Lymnaeidae	44
		Insecte	Odonate	Calopterygidae	1
		Insecte	Odonate	Libellulidae	5
		Gastéropode	Neotaenioglossa	Hydrobiidae	2
		Insecte	Odonate	Coenagrionidae	5
		Insecte	Ephemeroptera	Ephemerellidae	2
		Insecte	Hémiptère	Notonectidae	1
		Insecte	Hémiptère	Molannidae	2
		Insecte	Plécoptère	Pteronarcydae	1
		Insecte	Diptère	Chironomidae	1
		Crustacé	Amphipodes	Gammaridae	35
		Crustacé	Décapode	Cancriidae	2
Insecte	Odonate	Petaluridae	2		

Tableau 37: Liste des macroinvertébrés de la rivière Bagoé, 2017.

ANNEE	COURS D'EAU	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	NOMBRE
2017	Rivière Bagoé	Crustacé	Décapode	Cambaridae	14
		Gastéropode	Neotaenioglossa	Hydrobiidae	8
		Gastéropode	Basommatophora	Lymnaeidae	1
		Bivalve	Venorida	Sphaeriidae	5
		Insecte	Odonate	Petaluridae	1
		Insecte	trichoptère	Dipseudopsidae	2
		Insecte	Diptère	Chironomidae	19
		Bivalve	Unionidé	Unionidae	1
		Insecte	Diptère	Ceratopogonidae	17
		Insecte	Odonate	Libellulidae	9
		Crustacé	Amphipodes	Gammaridae	1
		Insecte	Hémiptère	Nepidae	1

Tableau 38:Liste des macroinvertébrés de la rivière Bagoé, 2018.

ANNEE	COURS D'EAU	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	NOMBRE
2018	Rivière Bagoé	Insecte	Diptère	Chironomidae	12
		Bivalve	Unionide	Unionidae	1
		Insecte	Coléoptère	Hydrophilidae	22
		Insecte	Hémiptère	Naucoridae	2
		Insecte	Hémiptère	Belostomatidae	1
		Bivalve	Venorida	Sphaeriidae	3
		Crustacé	Amphipode	Gammaridae	80
		Insecte	Odonate	Libellulidae	9
		Bivalve	Odonate	Unionidae	1
		Insecte	Hémiptère	Notonectidae	4
		Insecte	Coléoptère	Elmidae	1
		Insecte	Hétéroptère	Pleidae	1
		Insecte	Odonate	Lestidae	3

Tableau 39: Liste des macroinvertébrés de la rivière Bagoé en zone de référence, 2018.

ANNEE	COURS D'EAU	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	NOMBRE
2018	Rivière Bagoé	Insecte	Odonate	Aeshnidae	1
		Insecte	Trichoptère	Hydropsychidae	2
		Insecte	Coléoptère	Elmidae	1
		Bivalve	Venorida	Sphaeriidae	14
		Insecte	Hémiptère	Pleidae	10
		Insecte	Plécoptère	Leuctricidae	3
		Insecte	Diptère	Chironomidae	6
		Bivalve	Unionidé	Unionidae	2
		Insecte	Coléoptère	Hydrophilidae	2
		Insecte	Hémiptère	Mesoveliidae	1
			Nématode	Nématode	2
		Crustacé	Amphipode	Gammaridae	68
		Insecte	Odonate	Libellulidae	18
		Insecte	Diptère	Tipulidae	1
		Insecte	Hémiptère	Notonectidae	1
		Crustacé	Décapode	Cambaridae	1
Insecte	Odonate	Petaluridae	1		

- **Rivière Wassoulou balé:**

Tableau 40:Liste des macroinvertébrés de la rivière Wassoulou balé ,2016.

ANNEE	COURS D'EAU	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	NOMBRE
2016	Rivière Wassoulou balé	Bivalve	Venorida	Sphaeriidae	3
		Enopla	Hoplonemertea	Tetrastemmatidae	1
		Insecte	Hémiptère	Nepidae	1
		Insecte	Lépidoptère	Nymphe	1
		Insecte	Coléoptère	Hydrophilidae	1

- **Rivière Kobla babla:**

Tableau 41:Liste des macroinvertébrés de la rivière Kobla babla, 2016.

ANNEE	COURS D'EAU	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	NOMBRE
2016	Rivière Kobla babla	Bivalve	Venorida	Sphaeriidae	23

- **Ruisseau Bla:**

Tableau 42:Liste des macroinvertébrés du ruisseau Bla, 2016.

ANNEE	COURS D'EAU	CLASSE	ORDRE	FAMILLE	NOMBRE
2016	Ruisseau Bla	Insecte	Plécoptère	Perlodidae	1
		Insecte	Hémiptère	Corixidae	4
		Insecte	Odonate	Libellulidae	1
		Insecte	Diptère	Tipulidae	1
		Insecte	Hémiptère	Notonectidae	2
		Insecte	Odonate	Coenagrionidae	3
		Insecte	Coléoptère	Elmidae	1
		Insecte	Odonate	Petaluridae	6
		Enopla	Hoplonemertea	Tetrastemmatidae	2
		Insecte	Coléoptère	Hydrophilidae	6
		Insecte	Ephéméroptère	Ephemerellidae	1
		Insecte	Coléoptère	Gyrinidae	1

3.2. Intégrité physico-chimiques des cours d'eau:

L'analyse des paramètres physico-chimiques effectués par le laboratoire d'analyse SGS Lab. Bamako sur les échantillons d'eau provenant des cours d'eau (Bagoé, Wassoulou balé, Kobla babla, Bla) en zones d'orpillage et neutre durant la période d'étude (2016,2017 et 2018) nous ont donné les résultats suivants et qui ont été ensuite comparés aux valeurs de références de la DCE.

3.2.1. Cours d'eau en zone d'orpillage:

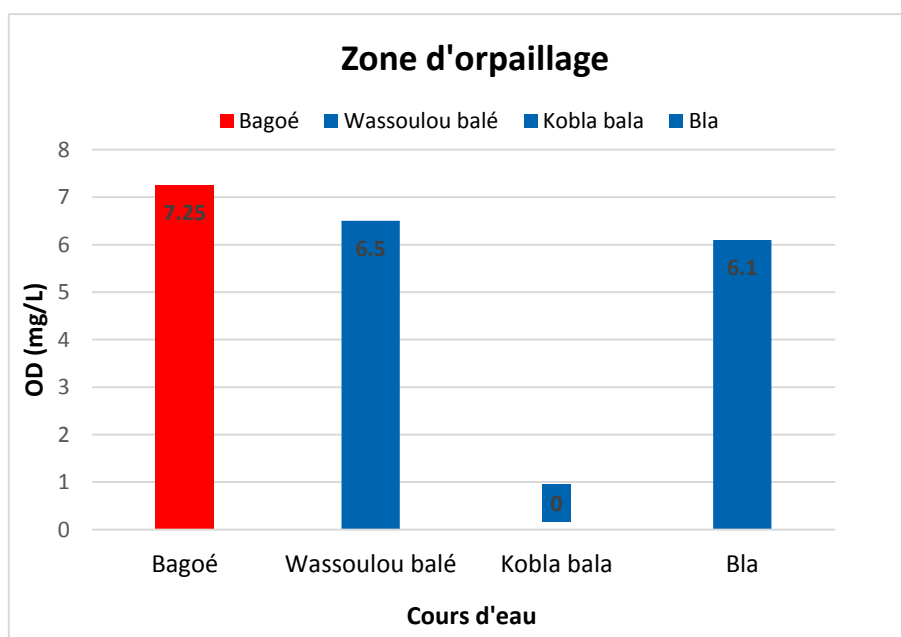


Figure 45:Oxygène dissous (OD) des cours d'eau dans la région de Sikasso.

Le taux d'oxygène dissous (OD) de la rivière Bagoé en zone d'orpillage est supérieur à celui des autres cours d'eau (Wassoulou balé, Bla) et complètement nul au niveau de la rivière Kobla babla signifiant l'absence de toute forme de vie. Comparé aux normes de la DCE, 2004 et seul le Kobla babla présente un très mauvais taux d'oxygène dissous.

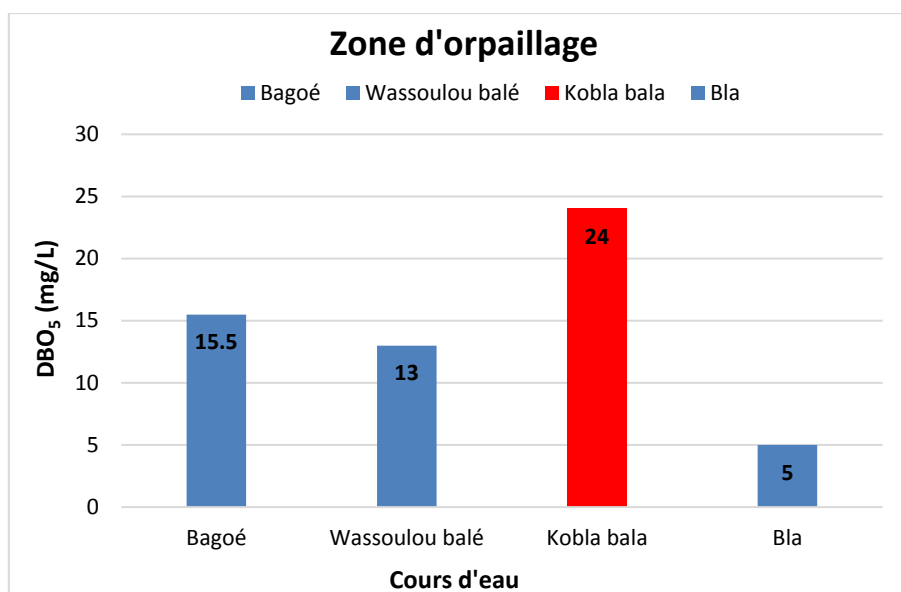


Figure 46: Demande biologique en oxygène (DBO₅) des cours d'eau, 2016.

La demande biologique en oxygène (DBO₅) est plus importante dans la rivière Kobla babla par rapport aux autres cours d'eau (Bagoé, Wassoulou balé et Bla). Comparé aux normes de la DCE, 2004 et seul le ruisseau Bla présente un bon taux de DBO₅.

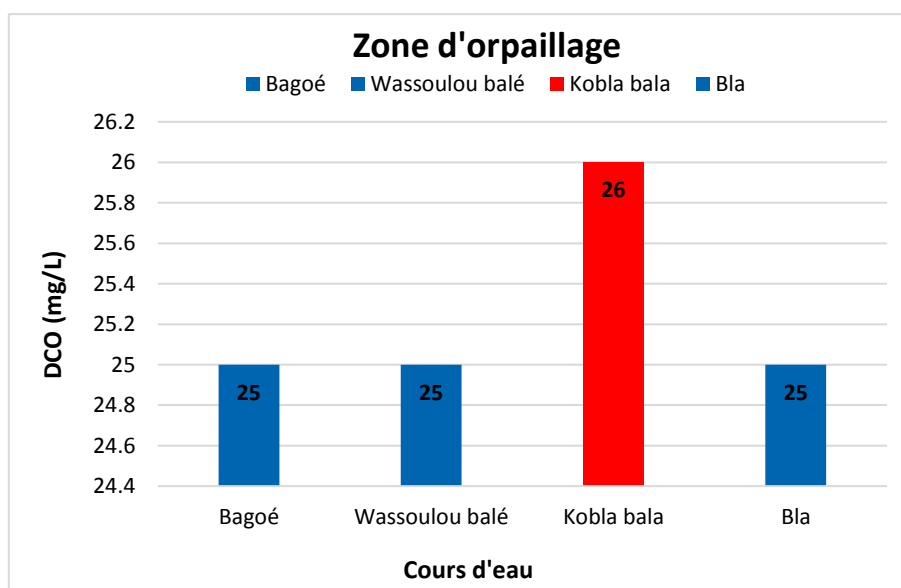


Figure 47: Demande chimique en oxygène (DCO) des cours d'eau, 2016.

La demande chimique en oxygène (DCO) est plus importante dans la rivière Kobla babla (DCO = 26 mg/L) par rapport aux autres cours d'eau (Bagoé, Wassoulou balé, Bla) qui ont une DCO inférieure ou égale à la limite de détection (25 mg/L) et très bonne pour l'ensemble des cours d'eau par rapport aux normes de la DCE, 2004.

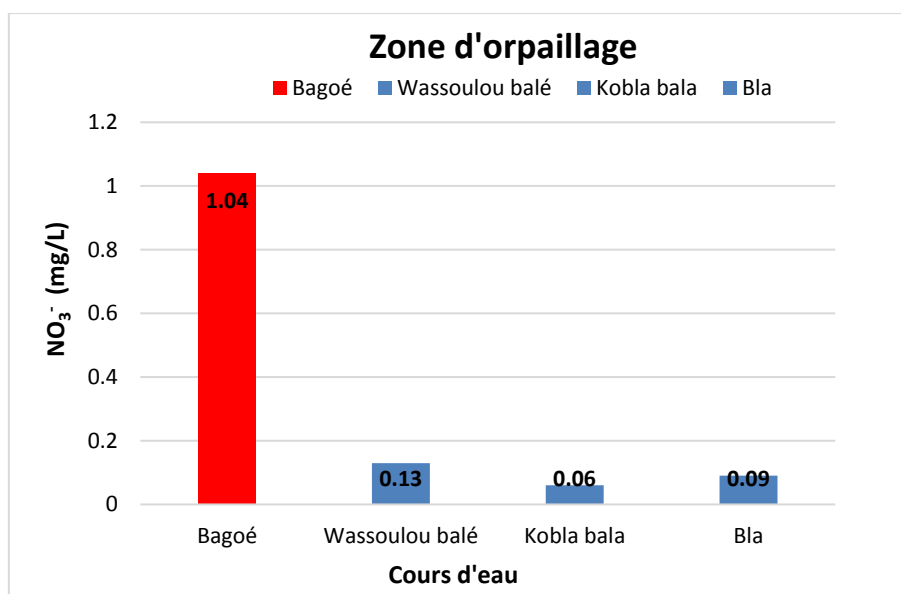


Figure 48: Taux de Nitrate (NO₃⁻) des cours d'eau, 2016.

Le taux de nitrate est plus élevé dans la rivière Bagoé (NO₃⁻ = 1,04 mg/L), que dans le Wassoulou balé (NO₃⁻ = 0,13 mg/L), le Bla (NO₃⁻ = 0,9 mg/L) et le Kobala bala (NO₃⁻ = 0,06 mg/L). L'ensemble des 4 cours d'eau présente un bon taux en nitrate comparé aux normes de références de la DCE, 2004.

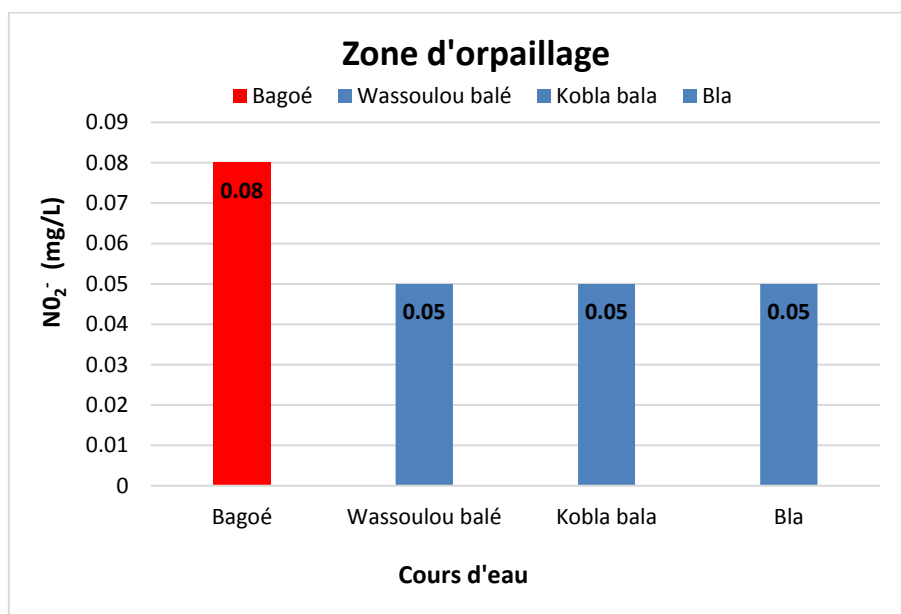


Figure 49: Taux de Nitrite (NO₂⁻) des cours d'eau, 2016.

La concentration en nitrite est plus élevée dans le Bagoé (NO₂⁻ = 1,04 mg/L) par rapport aux autres cours d'eau (Wassoulou balé, le et le Kobala bala) dont les valeurs sont inférieures ou égales à la limite de détection (0,05 mg/L). Comparé aux normes de la DCE (2004), la rivière Bagoé présente un mauvais taux de nitrite.

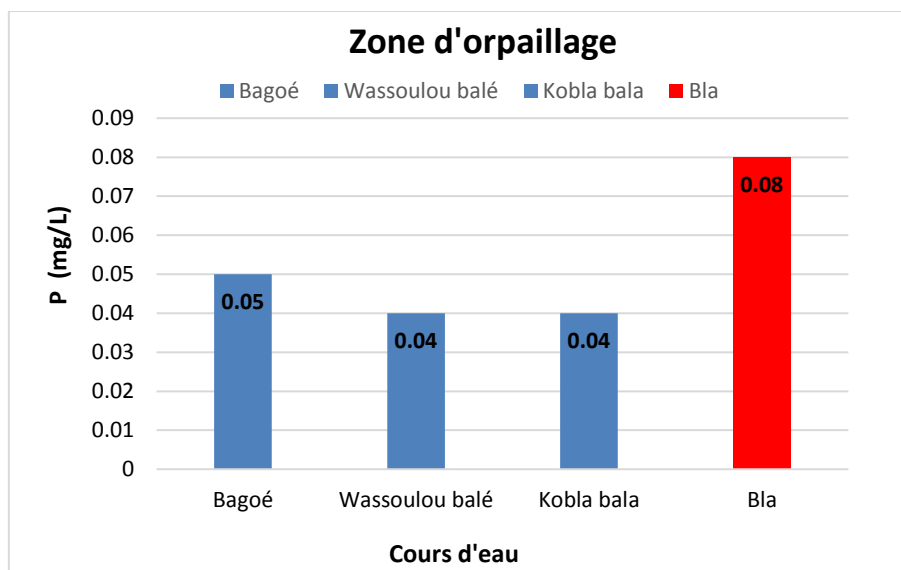


Figure 50: Phosphore total (P) des cours d'eau, 2016.

Le ruisseau Bla possède un taux de phosphore plus élevé par rapport aux autres cours d'eau (Bagoé, Wassoulou balé, et le Kobla babla).

Comparés aux normes de références de la DCE (2004), l'ensemble des cours d'eau présente une bonne concentration en phosphore.

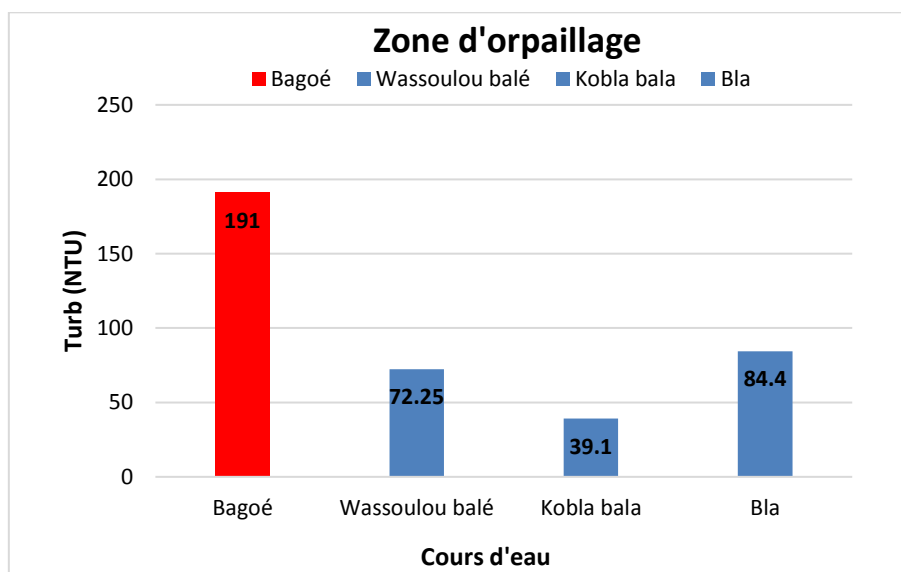


Figure 51: Turbidité (Turb) des cours d'eau dans la région de Sikasso.

La turbidité est plus élevée dans la rivière Bagoé (Turb=191 NTU), par rapport aux autres cours le Bla (Turb=84,4 NTU), le Wassoulou Balé (Turb=72,25 NTU), et Kobla babla (Turb = 39,1NTU). Comparés aux normes de la DCE (2004), le Bagoé, le Wassoulou balé, le Bla présentent une mauvaise turbidité et seule la rivière Kobla babla présente une bonne turbidité.

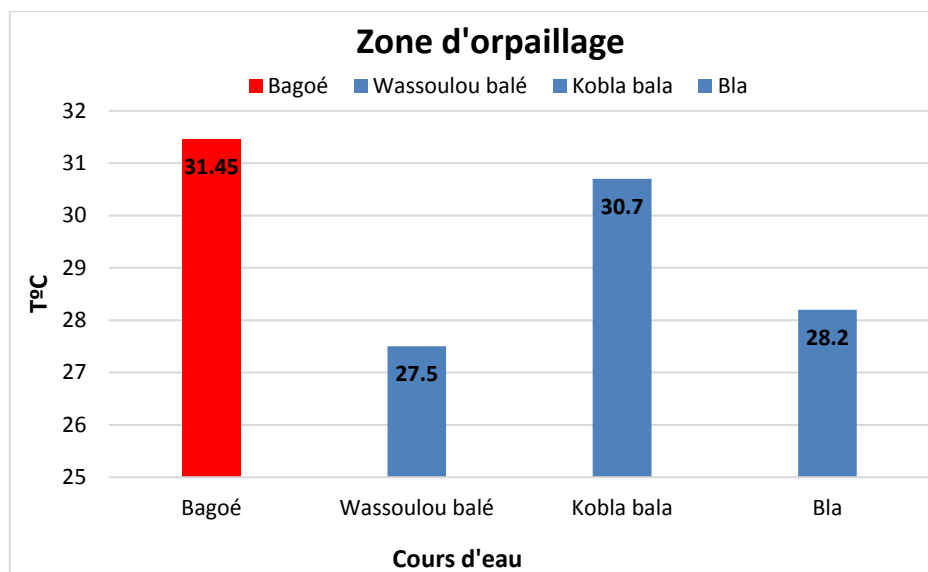


Figure 52:Température (T°C) des cours d'eau,2016.

La température de la rivière Bagoé est supérieure à celle des trois autres cours d'eau (Wassoulou balé, Kobla bala, Bla) et tous les 4 cours d'eau présentent une mauvaise température (T°C) par rapport aux normes de références de la DCE.

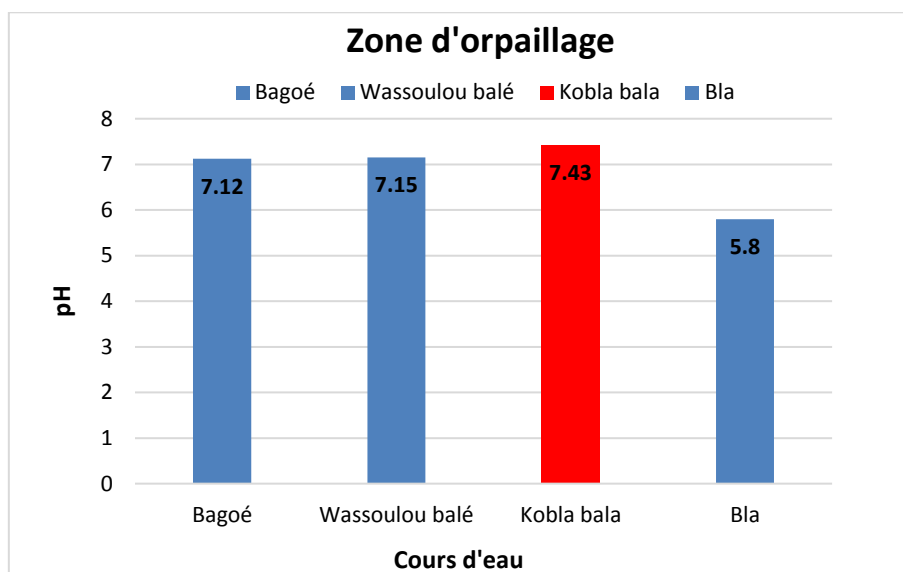


Figure 53:Potentiel d'hydrogène (pH) des cours d'eau,2016.

Le potentiel d'hydrogène (pH) pour tous les 4 cours présente des valeurs conformes aux normes de référence de la DCE.

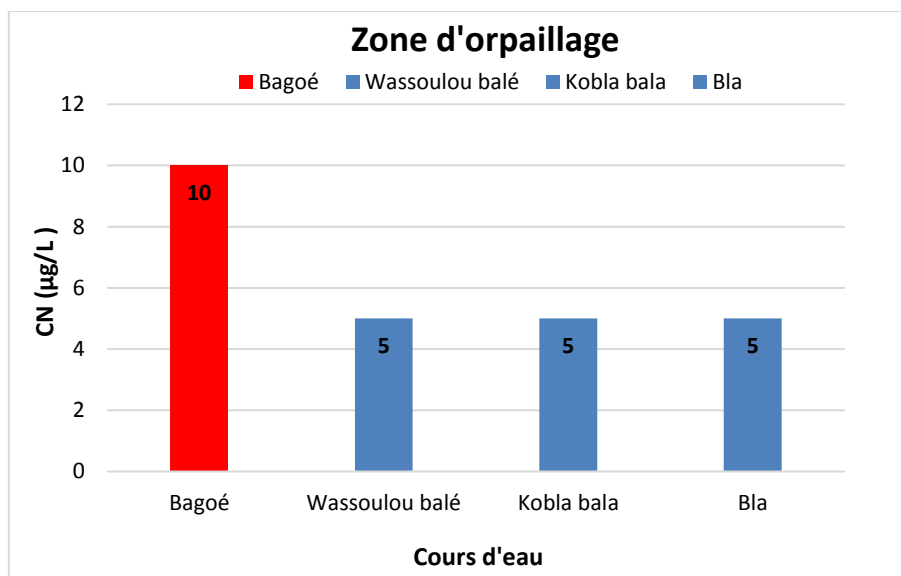


Figure 54: Concentration en cyanure (CN) des cours d'eau, 2016.

La rivière Bagoé en zone d'orpillage présente des traces de cyanure (CN=10 µg/L) et supérieure aux taux de CN des trois autres cours d'eau (Wassoulou balé, Kobla babla, Balé) dont les valeurs sont inférieures à la limite de détection (5 µg/L).

Comparée aux normes de références de la DCE, la rivière Bagoé aligne un mauvais taux en CN.

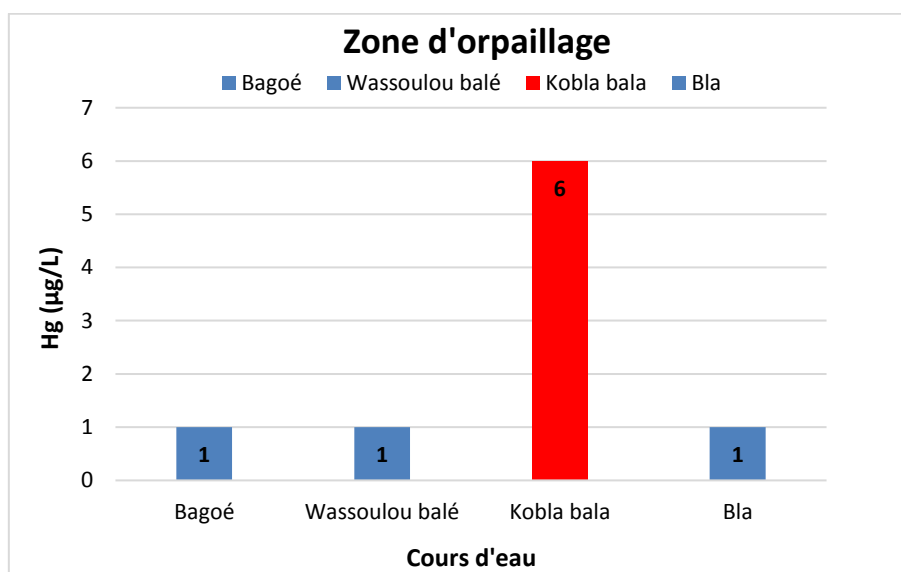


Figure 55: Concentration de mercure (Hg) des cours d'eau, 2016.

On constate un taux de mercure (Hg) plus élevé dans le Kobla babla par rapport aux trois autres cours d'eau (Bagoé, Wassoulou balé et Bla).

Comparé aux normes de référence de la DCE, le Kobla babla présente un très mauvais taux de mercure (Hg).

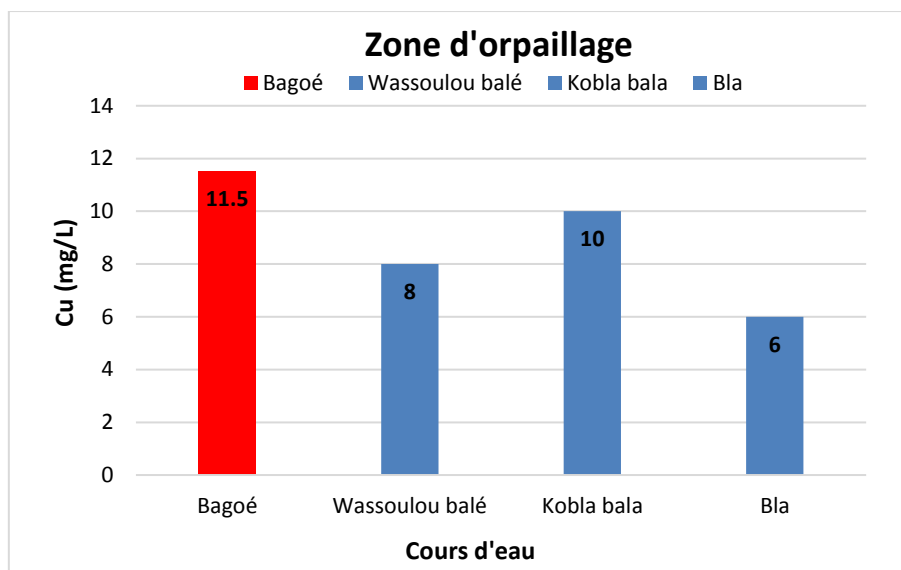


Figure 56: Concentration en cuivre (Cu) des cours d'eau, 2016.

La concentration en cuivre (Cu) de la rivière Bagoé (Cu = 11,5 µg/L) est supérieure à celle du Wassoulou balé (Cu = 8 µg/L), du Kobla babla (Cu = 10 µg/L) et du Bla (Cu = 6 µg/L). La concentration en cuivre (Cu) pour l'ensemble des 4 cours d'eau est mauvaise DCE

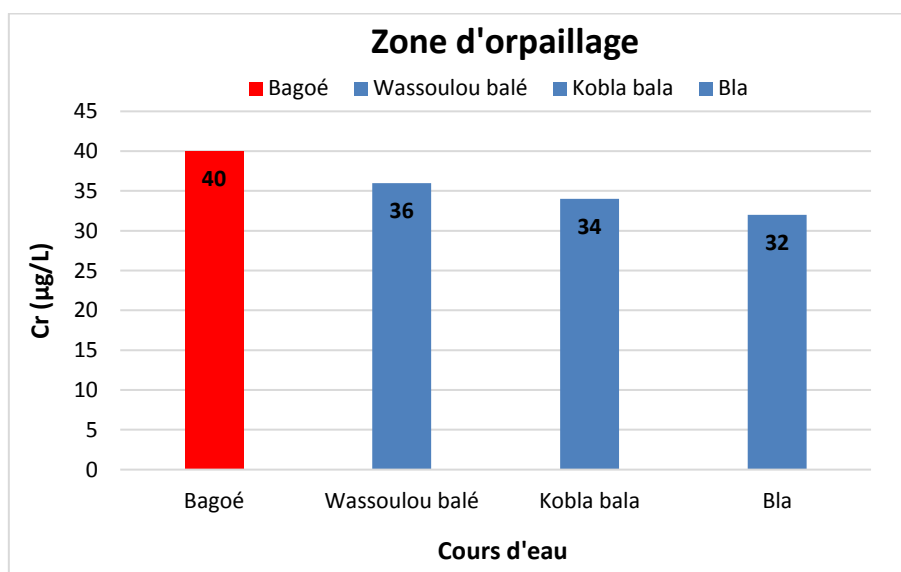


Figure 57: Concentration en chrome (Cr) des cours d'eau, 2016.

La concentration en chrome (Cr) de la rivière Bagoé est supérieure (Cr = 40 µg/L), à celle du Wassoulou bale (Cr = 36 µg/L), du Kobla babla (Cr = 34 µg/L) et du Bla (Cr = 32µg/L). Comparé aux normes de référence de la DCE, l'ensemble des 4 cours d'eau présente une mauvaise concentration en chrome (Cr).

3.2.2. Bagoé en zone d'orpaillage:

L'analyse des paramètres physico-chimiques de la rivière Bagoé (2017 et 2018) en zone d'orpaillage (Massiogocoro, Massiogocoura, Alihamdoullilae), nous donne les résultats suivants :

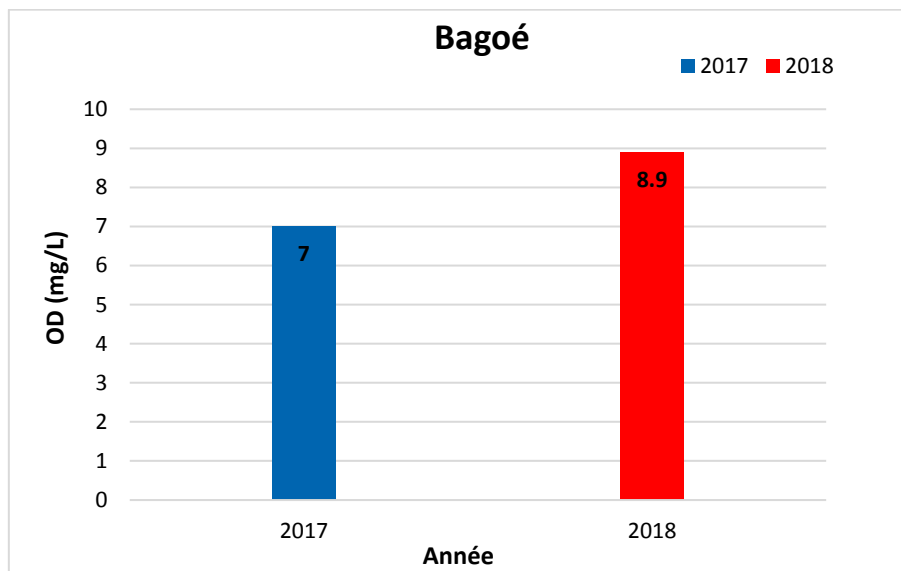


Figure 58: Oxygène dissous (OD) de la rivière Bagoé (2017-2018).

Le taux d'oxygène dissous (OD) du Bagoé a augmenté (OD = 7 mg/L) de 2017 à 2018 (OD = 8.9 mg/L).

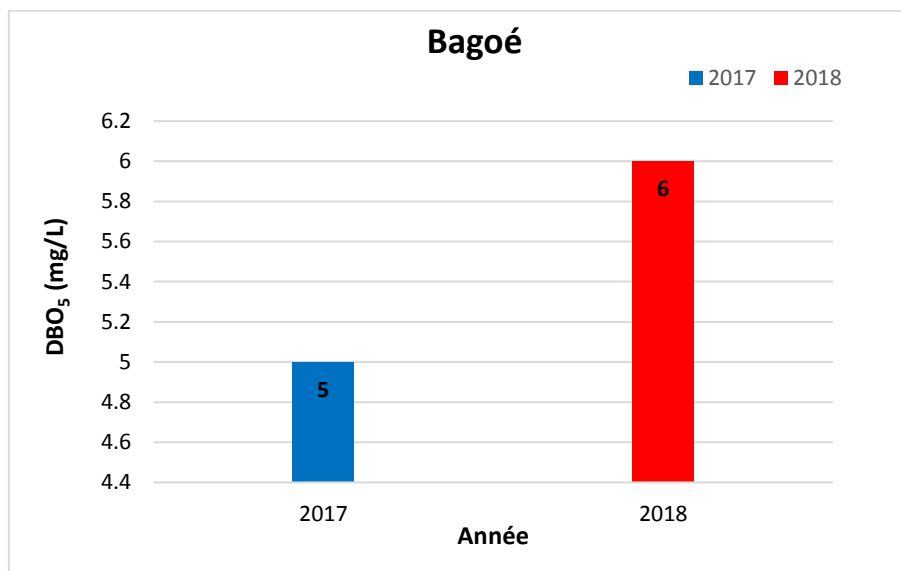


Figure 59: Demande biologique en oxygène (DBO₅) de la rivière Bagoé (2017-2018).

On constate une augmentation de la demande biologique en oxygène (DBO₅ = 5mg/L) de 2017 à 2018 (DBO₅ = 6 mg/L). Comparé aux normes de la DCE, le taux de DBO₅ est bon en 2017 et 2018.

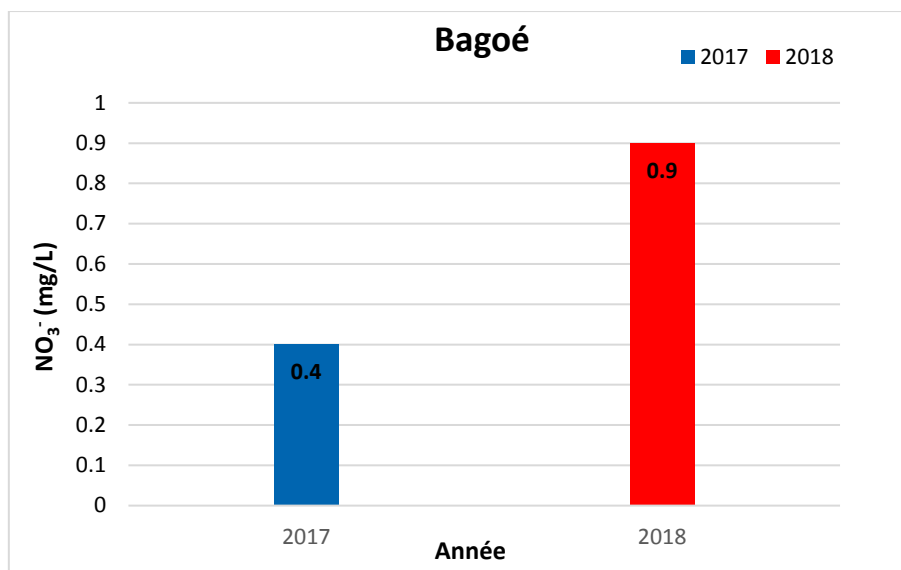


Figure 60: Taux de nitrate (NO₃⁻) de la rivière Bagoé (2017-2018).

On note également une augmentation du taux de nitrate (NO₃⁻) dans la rivière Bagoé de 2017 (NO₃⁻ = 0.4 mg/L) à 2018 (NO₃⁻ = 0.9 mg/L).

Comparé aux normes de la DCE.

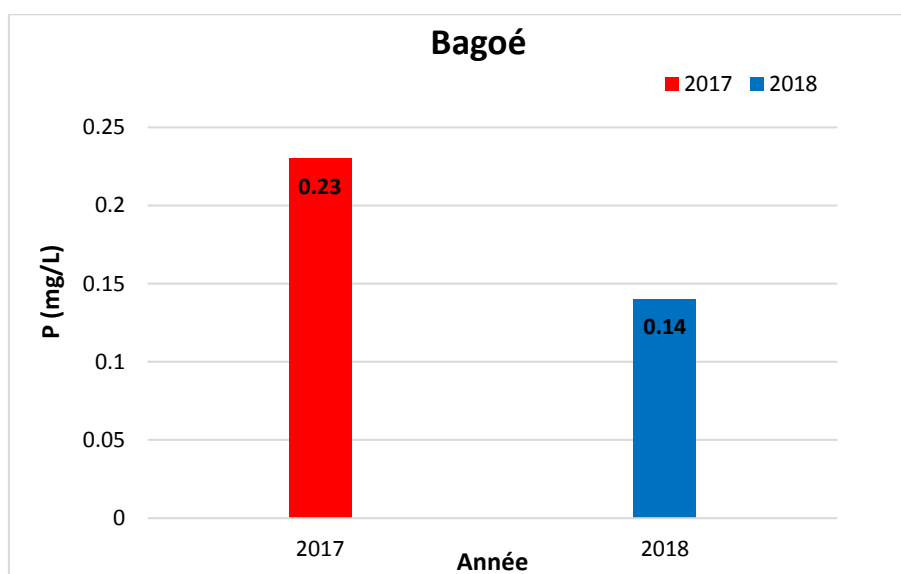


Figure 61: Taux de Phosphore total (P) de la rivière Bagoé (2017-2018).

On note une diminution du taux de phosphore (P) de 2017 (P = 0,23 mg/L) à 2018 (P = 0,14mg/L). Comparé aux normes de la DCE, le taux de Phosphore est bon en 2017 et 2018.

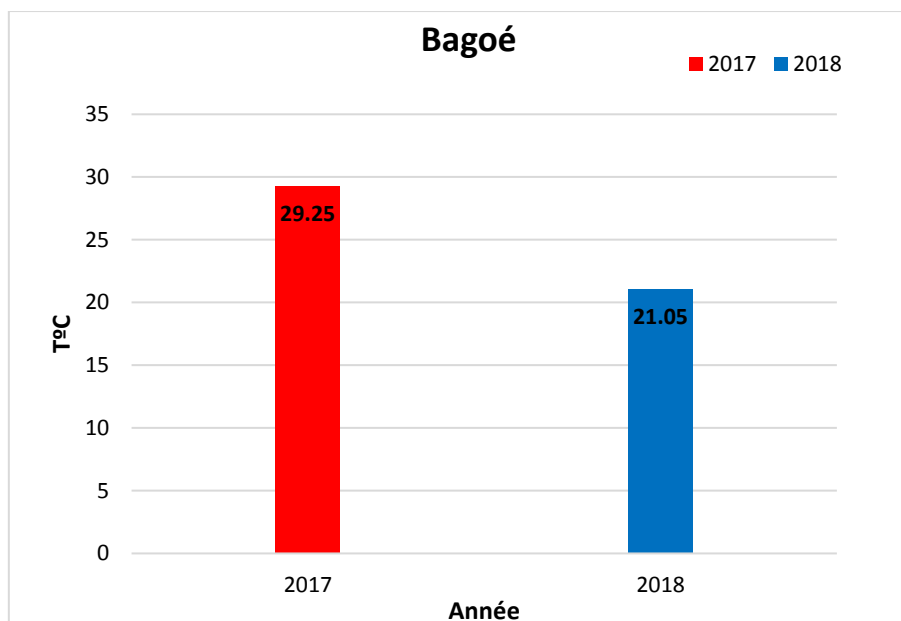


Figure 62:Température (T°C) du Bagoé (2017-2018).

On note une différence de température de la rivière Bagoé en 2017 ($T = 29,25^{\circ}\text{C}$) plus élevée que la température en 2018 ($T = 21,05^{\circ}\text{C}$) et cela est due à la période d'échantillonnage, Janvier pour 2018 et Mars pour 2017.

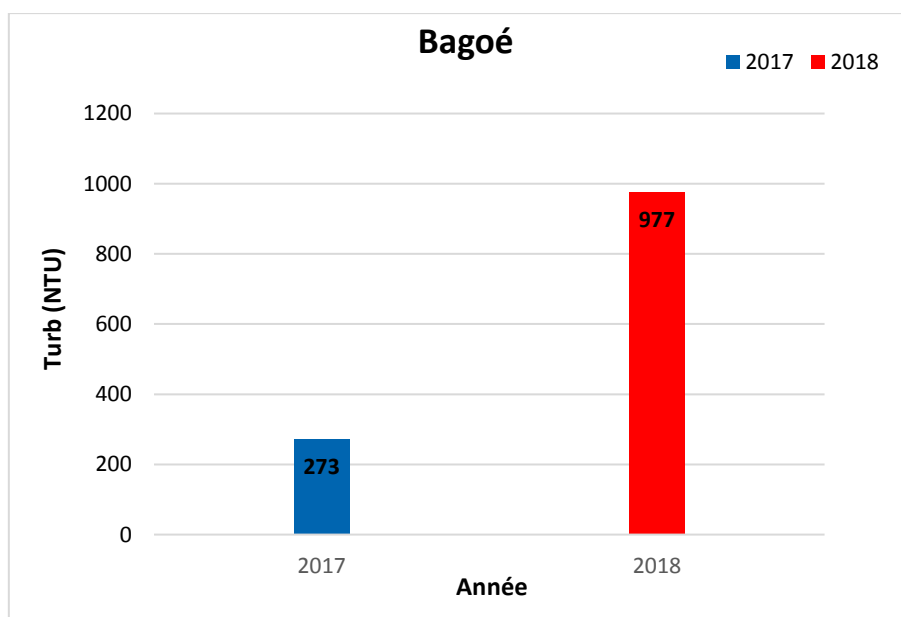


Figure 63:Turbidité (Turb) du Bagoé (2017-2018).

La turbidité de la rivière Bagoé a augmenté de 2017 (Turb = 233 NTU) à 2018 (Turb = 977 NTU) et comparée aux normes de référence de la DCE, elle est très mauvaise au cours des deux années.

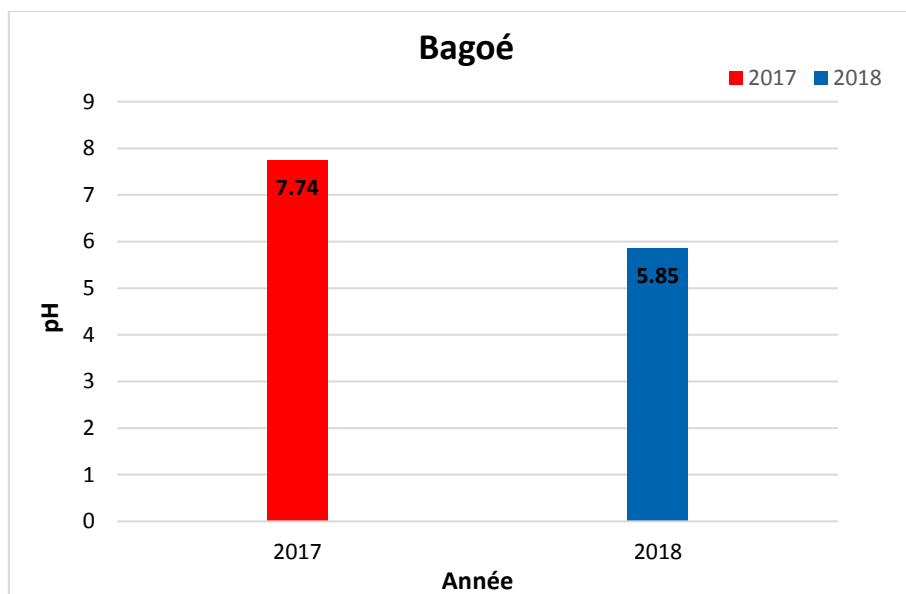


Figure 64: Potentiel d'hydrogène (pH) de la rivière Bagoé (2017-2018).

On constate une baisse du potentiel d'hydrogène (pH) du Bagoé entre 2017 (pH = 7.74) et 2018 (pH = 5.85) et comparé aux normes de référence de la DCE, le pH est très bon en 2017 et moyen en 2018.

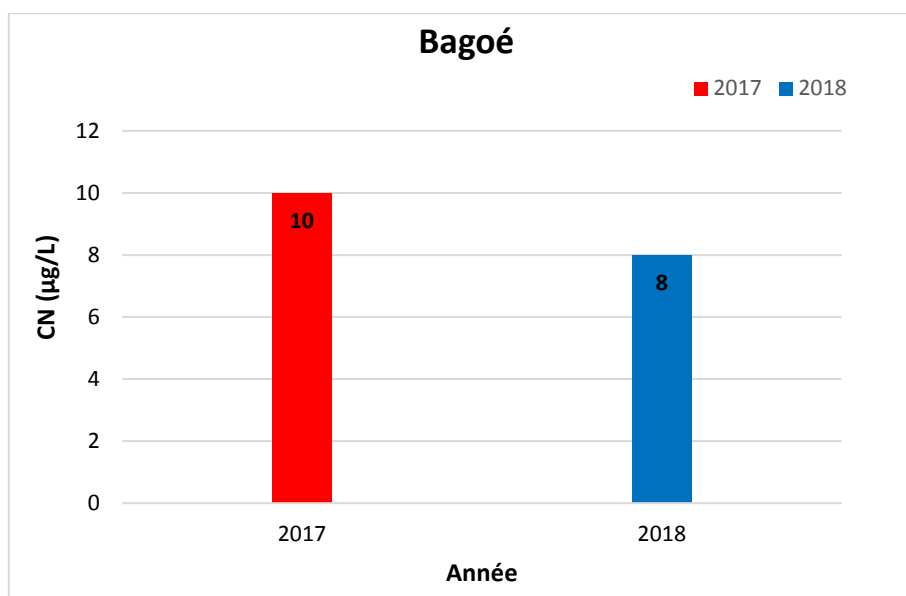


Figure 65: Taux de cyanure (CN) de la rivière Bagoé (2017-2018).

Le taux de cyanure (CN) de la rivière Bagoé a baissé entre 2017 (CN = 10 µg/L) et 2018 (CN = 8 µg/L). Comparé aux normes de référence de la DCE cette concentration en CN est mauvaise au cours des deux années (2017 et 2018).

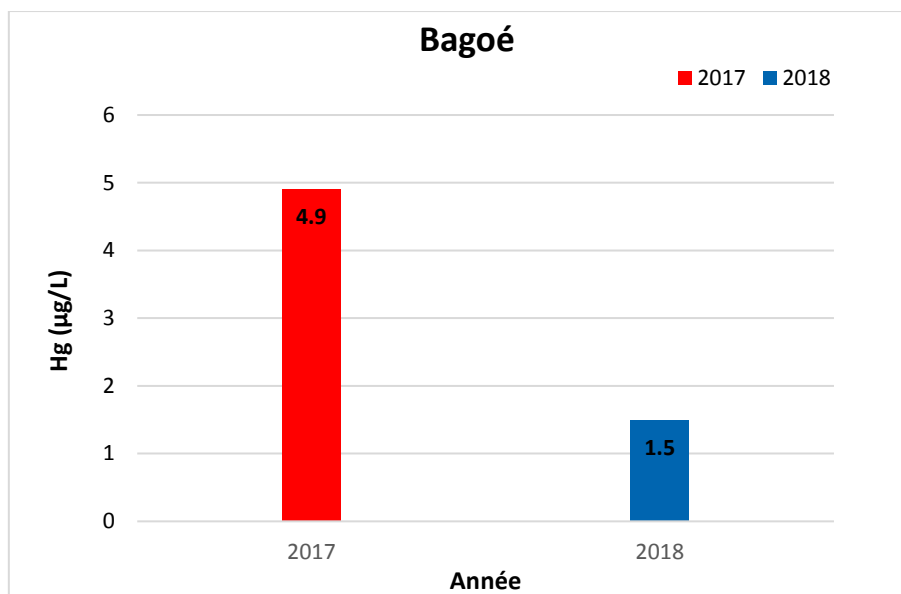


Figure 66: Concentration en mercure (Hg) de la rivière Bagoé (2017-2018).

La concentration en mercure (Hg) du Bagoé a baissé entre 2017 (Hg = 4,9 µg/L) et 2018 (Hg = 1,5µg/L).

3.2.3. Bagoé en zone neutre (Niougoni):

En 2018, nous avons analysé les paramètres physico-chimiques du Bagoé au niveau du village de Niougoni (Cote d’ivoire, comme site de référence) et le Bagoé au niveau du site d’orpaillage artisanal de Massiogocoura (Mali). Les résultats obtenus sont les suivants :

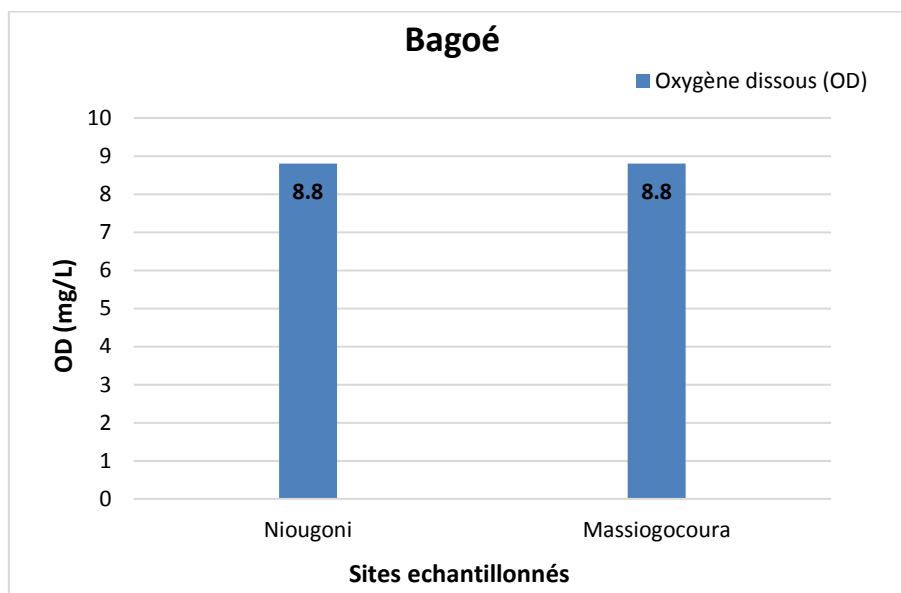


Figure 67: OD de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

L’oxygène dissous (OD) de la rivière Bagoé est la même en zone neutre sur le site de Niougoni que sur le site Massiogocoura en zone d’orpaillage (OD = 8 mg/L). Comparé aux normes de

référence de la DCE, l'oxygène dissous pour les deux sites (Niougoni et Massiogocoura) est bon.

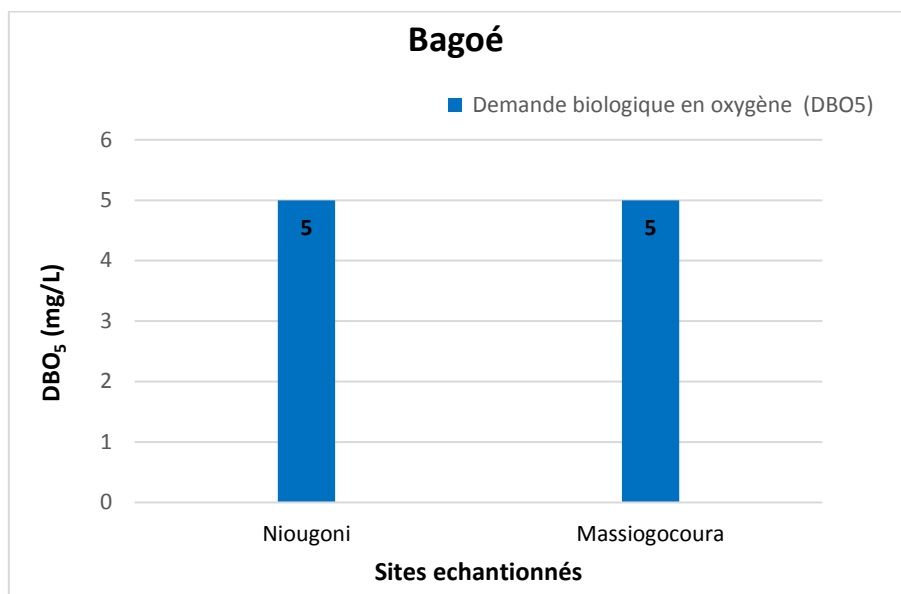


Figure 68: DBO₅ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

La demande biologique en oxygène (DBO₅) est la même sur le site Niougoni et Massiogocoura (DBO₅ = 5mg/L) et comparée aux normes de la DCE, la DBO₅ pour les deux sites est bonne.

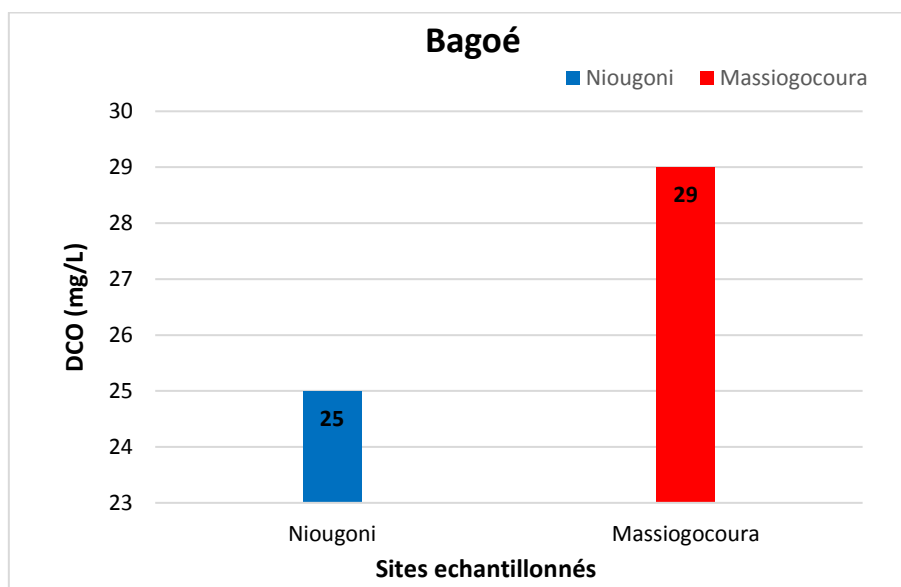


Figure 69: DCO de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

La demande chimique en oxygène est plus importante à Massiogocoura (DCO = 29 mg/L) par rapport au site de Niougoni (DCO = 25 mg/L). Comparée aux normes de la DCE (2004), la DCO pour les deux sites est bonne.

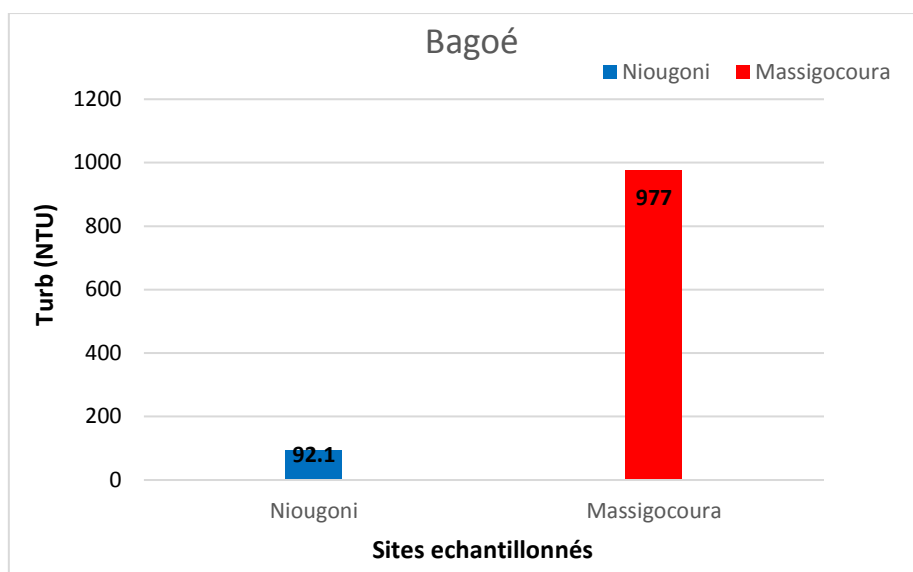


Figure 70: Turb de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

La turbidité de la rivière Bagoé proche de l'orpaillage de Massiogocoura est nettement supérieure (Turb = 977 NTU) à celle du site Niougoni (Turb = 92,1 NTU). Comparé aux normes de la DCE, la turbidité est moyenne sur le site de Niougoni et très mauvaise sur le Massiogocoura.

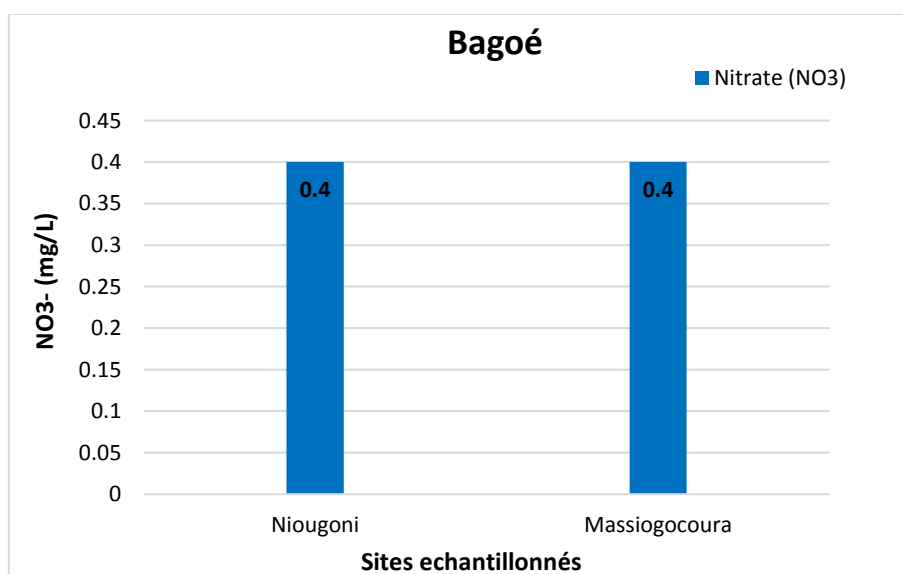


Figure 71: NO₃⁻ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

La concentration en nitrate NO₃⁻ de la rivière Bagoé est la même sur le site de Niougoni, que le site de Massiogocoura (NO₃⁻ = 0,4 mg/L). Comparé aux normes de références de la DCE, le taux de nitrate est très bon.

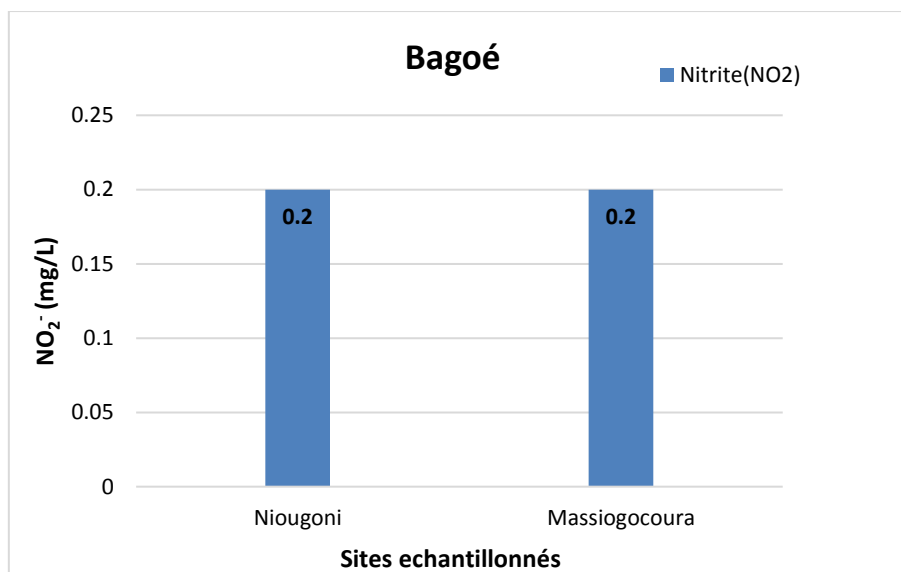


Figure 72: NO₂⁻ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

Le taux de nitrate NO₂⁻ de la rivière Bagoé est le même sur le site de Niougoni en zone neutre, que le site de Massiogocoura (NO₂⁻ = 0,2 mg/L) en zone d'orpillage. Comparé aux normes de référence de la DCE, le taux de nitrite est très bon.

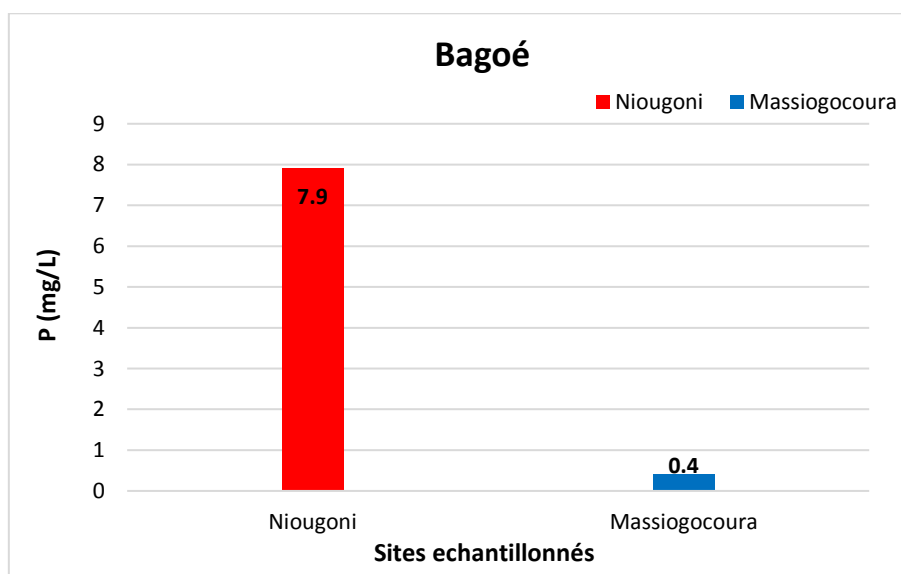


Figure 73: Phosphore total (P) de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

Le taux de phosphore (P) est plus élevé sur le site de Niougoni (P = 7,9 mg/L) que sur le site de Massiogocoura (P = 0,4 mg/L). Comparé aux normes de références de la DCE, le taux de P de la rivière Bagoé sur le site de Niougoni est très mauvais (DCE, 2004) et moyen sur le site de Massiogocoura.

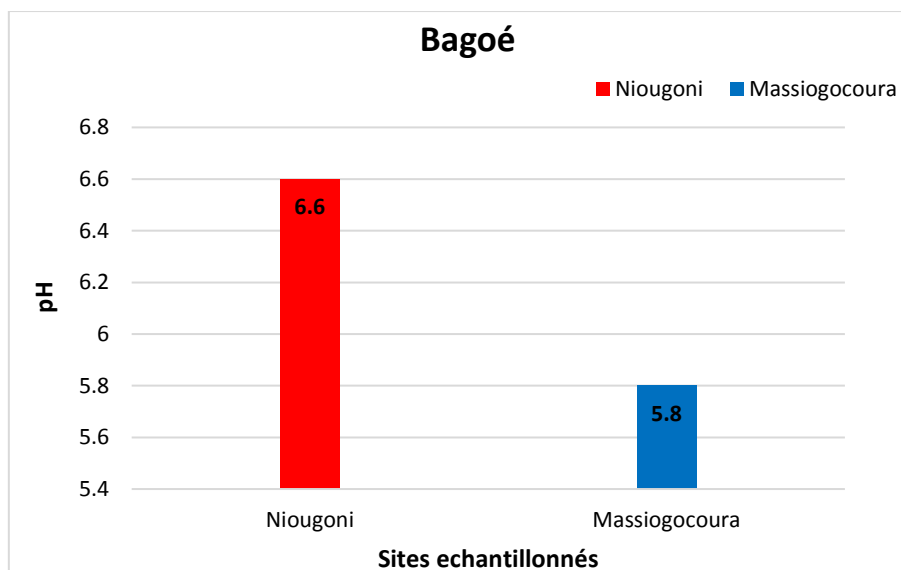


Figure 74: pH de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

Le potentiel hydrogène (pH) de la rivière Bagoé, sur le site de Niougoni (pH = 6,6) plus élevé que celui du pH du site Massiogocoura (PH = 5,8). Comparé aux normes de références de la DCE, le pH de la rivière Bagoé sur le site de Niougoni est bon et moyen sur le site de Massiogocoura.

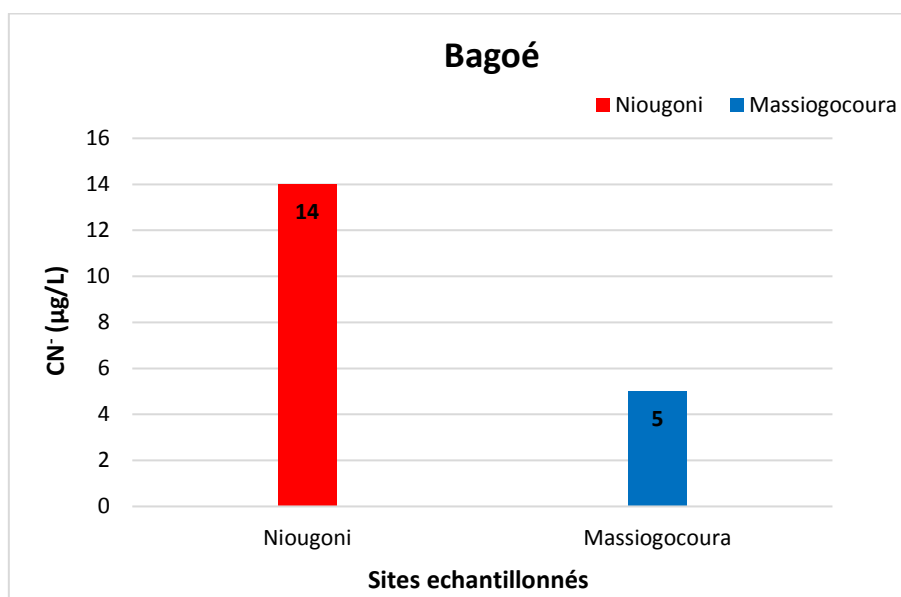


Figure 75: CN⁻ de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

Le taux de cyanure (CN⁻) de la rivière Bagoé sur le site Niougoni (CN⁻ = 14 µg/L) en zone neutre est plus élevé que sur le site Massiogocoura (CN⁻ = 5 µg/L) en zone d'orpillage. Comparé aux normes de la DCE, le taux de CN⁻ est mauvais sur les deux sites.

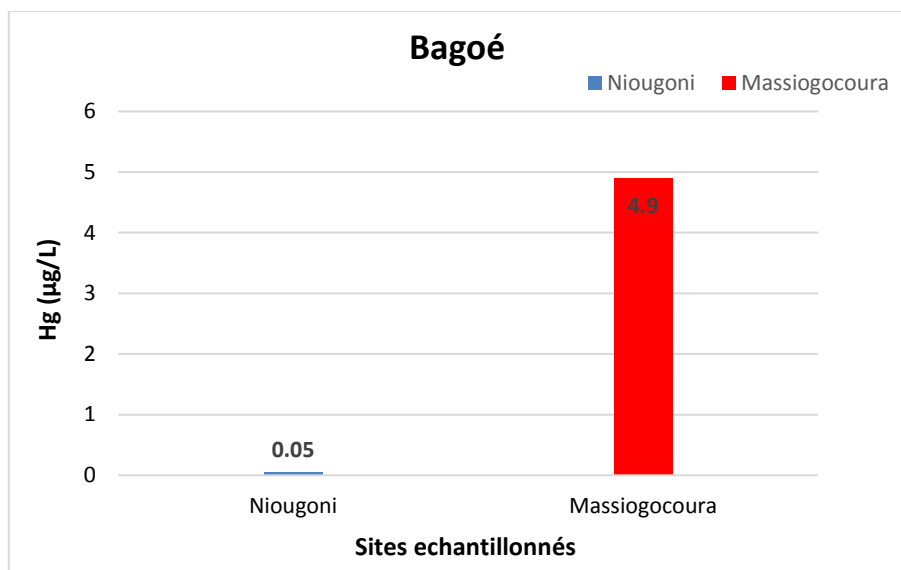


Figure 76: Hg de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

Le taux de mercure (Hg) de la rivière Bagoé sur le site de Massiogocoura (Hg = 4,9 µg/L) est plus élevé que celui du site de Niougoni (Hg = 0,05 µg/L) en zone neutre.

Comparé aux normes de références de la DCE, le taux de mercure est très mauvais sur le site de Massiogocoura (zone d'orpaillage) et très bon sur le site de Niougoni (zone neutre).

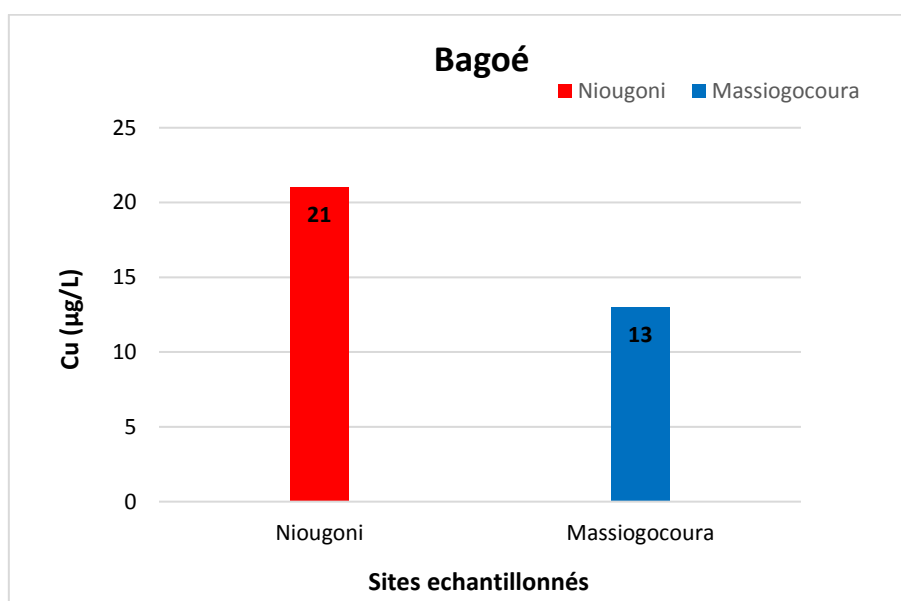


Figure 77: Cu de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

Le taux de cuivre (Cu) de la rivière Bagoé sur le site de Niougoni (Cu = 21µg/L), est plus élevé que celui du site de Massiogocoura (Cu = 13 µg/L). Comparé aux normes de référence de la DCE.

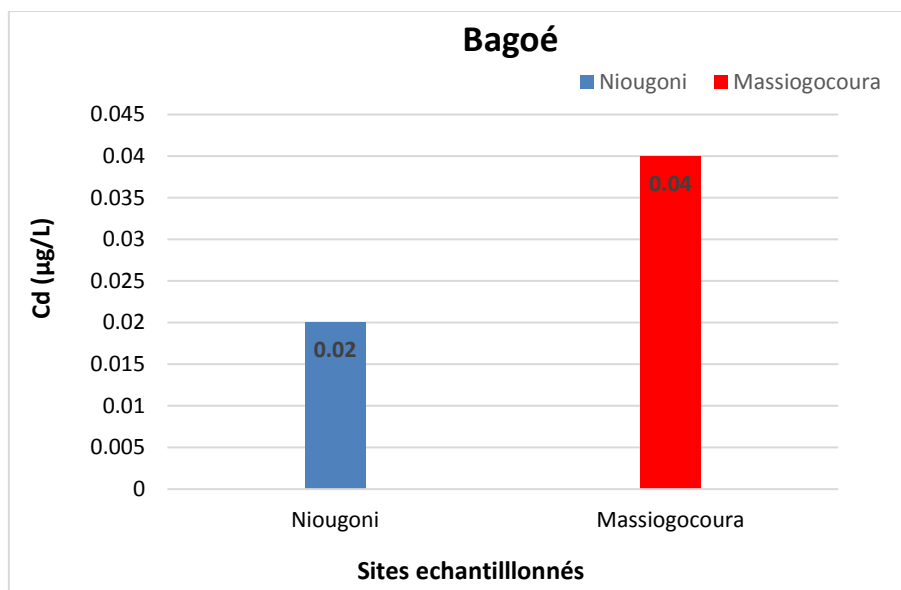


Figure 78: Cd de la rivière Bagoé par rapport au site de référence, 2018.

Le taux de cadmium (Cd) de la rivière Bagoé sur le site de Niougoni (Cd = 0,02 µg/L) est inférieur à celui du site Massiogocoura (Cd = 0,04 µg/L) et comparé aux normes de référence de la DCE, le taux de Cd des deux sites est bon.

3.3. Analyse Canonique de Correspondance (ACC):

L'analyse canonique de correspondance (ACC) des paramètres physico-chimiques des cours d'eau (Bagoé, Wassoulou balé, Kobla babla et Bla) et les données mésologiques (Abondance relative aux familles de macroinvertébrés) a permis de faire la représentation graphique en figure73 et les boulettes en bas définie les abréviations par la même figure :

- Cours d'eau:

1 = Bagoé (2016), 2 = Bagoé (2017), 3 et 4 Bagoé (2018), 5 = Wassoulou balé, 6 = Kobla babla, 7 = Bla.

- Macroinvertébrés benthiques:

Ch = Chironomidae, **Li** = Libellulidae, **Ly** = Lymnaeidae, **Sp** = Spheridae, **No** = Notonectidae, **Ga** = Gammaridae, **Pl** = Pleidae, **Hb** = Hydrobiidae, **Hd** = Hydrophilidae, **Ce** = Ceratopogonidae, **Ca** = Cambaridae, **Pet** = Petaluridae, **Co** = Coenagrionidae, **Pet** = Petaluridae, **Cor** = Corixidae, **Le** = Lestidae

- Paramètres physico-chimiques:

T = Température, **Turb** = Turbidité, **PH** = Potentiel d'hydrogène, **OD** = Oxygène dissous
Cd = Cadmium, **Pb** = Plomb, **Cn** = Cyanure, **Hg** = Mercure, **Zn** = Zinc, **Cr** = Chrome,
SO4 = Sulfate, **P** = Phosphore total, **NO2** = Nitrite, **NO3** = Nitrate, **DBO5** = Demande biologique en oxygène, **DCO** = Demande chimique en oxygène

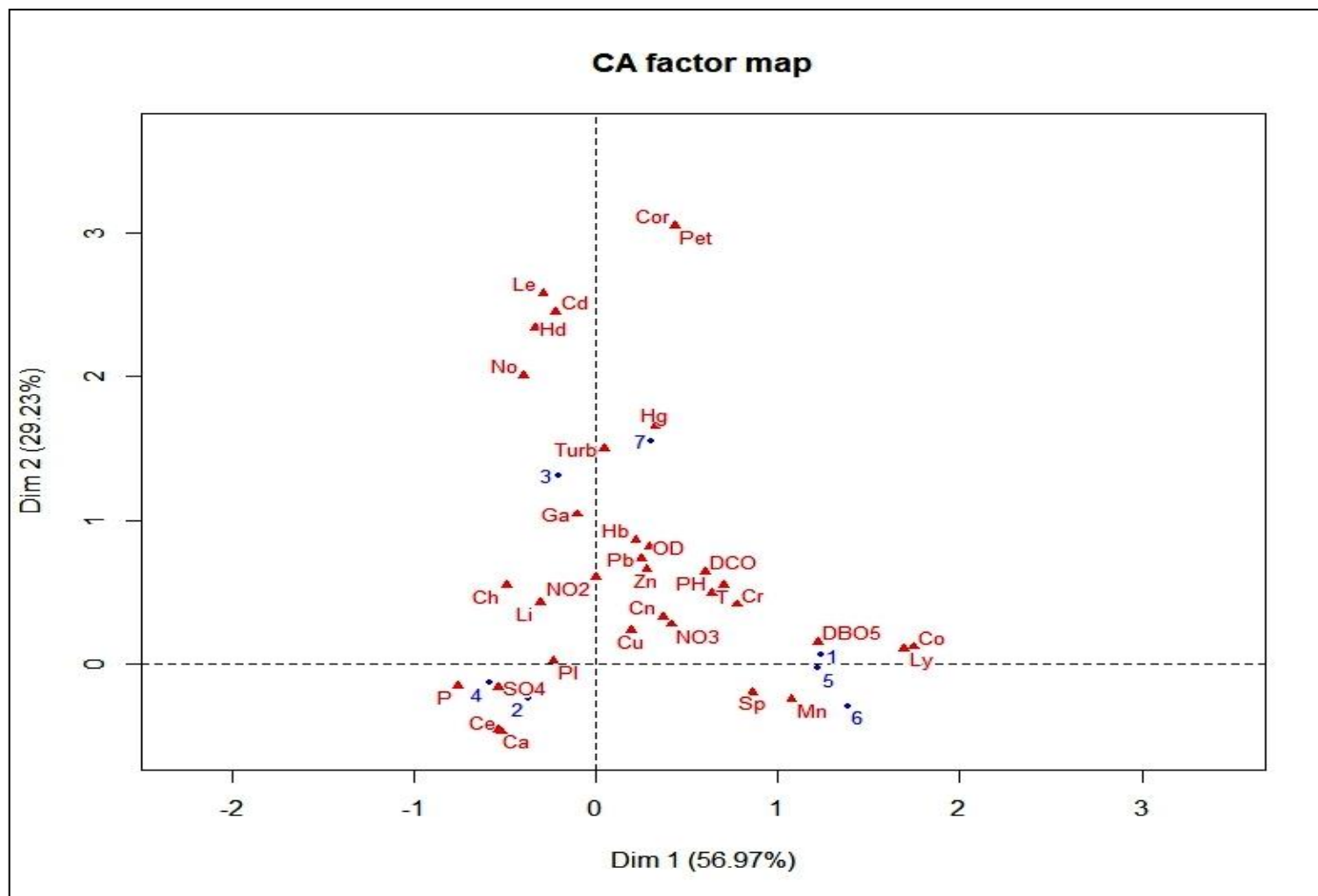


Figure 79: ACC des cours d'eau dans la région de Sikasso en zone d'orpaillage.

L'analyse canonique de correspondance (ACC) des données mésologiques (paramètres physico chimiques) et des relevés faunistiques (abondance relative des familles) nous renseigne sur les corrélations existantes au sein des cours d'eau :

3.3.1. Bagoé:

En 2016, la rivière Bagoé présente sur le second axe (Dim2) une corrélation positive entre la DBO5 et l'abondance relative des Coenagrionidae (Co), des Lymnaeidae (Ly).

En 2017, on constate une corrélation négative sur le premier axe (Dim1) entre le phosphore total (P), le sulfate (SO4) et l'abondance relative des Ceratopogonidae (Ce), des Cambaridae (Ca), des Pleidae (Pl).

En 2018, on note une corrélation positive (Dim1) entre la turbidité (Tub) et l'abondance relative des Gammaridae (Ga) et sur le même axe (Dim1) indique une corrélation positive entre le Cadmium (Cd) et l'abondance relative des Hydrophilidae (Hd), des Notonectidae (No) et des Lestidae (Le).

3.3.2. Wassoulou balé:

Le Wassoulou balé à l'instar de la rivière Bagoé en 2016, présente une corrélation positive sur le second axe (Dim2) entre la demande biologique en oxygène (DBO5) et l'abondance relative des Coenagrionidae (Co), des Lymnaeidae (Ly).

3.3.3. Kobla babla:

On note une corrélation positive entre le Manganèse (Mn) et l'abondance relative des Spheridae sur le second axe (Dim2).

3.3.4. Bla:

Au sein du ruisseau Bla, on note une faible corrélation positive entre l'abondance relative des Corixidae (Co) et des Petaluridae (Pet) et le mercure (Hg).

4. DISCUSSIONS:

4.1. Structure de la communauté de macroinvertébrés benthiques:

La communauté de macroinvertébrés est composée à 79% d'insectes, 11% de mollusques, 5% de crustacés et 5% d'oligochètes. Cette représentativité est typique à celle des cours d'eau douce d'africaine (Déjoux *et al.* 1969).

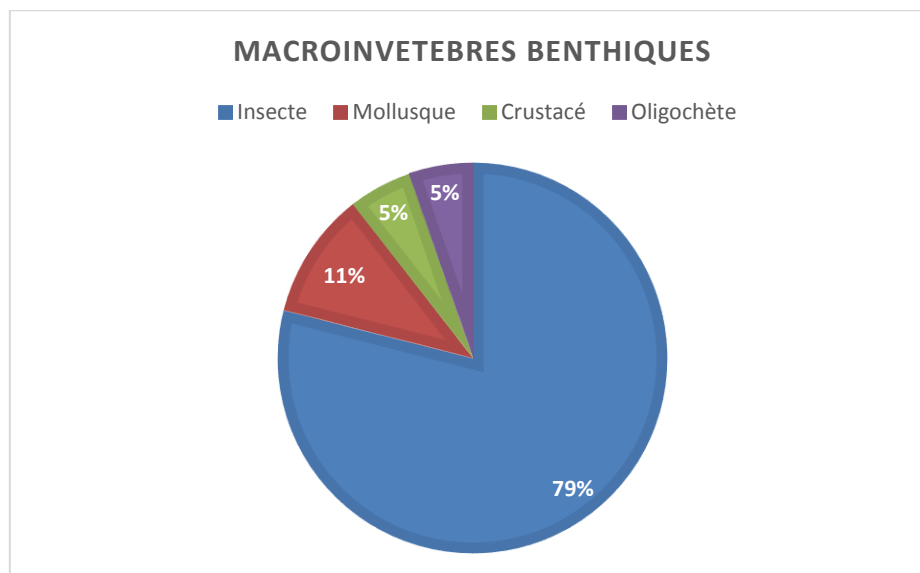


Figure 80:

Figure 80: Macroinvertébrés benthiques des cours d'eau en zone d'orpillage.

4.1.1. Cours d'eau en zone d'orpillage (Année 2016):

En 2016, nous avons échantillonné 4 cours d'eau différents dans la région de Sikasso (Bagoé, Wassoulou blé, Kobla babla et Bla) en zone d'orpillage.

4.1.1.1. Intégrité biologique:

Les résultats obtenus nous montrent une nette supériorité de la richesse spécifique (F) au sein de la rivière Bagoé (F = 18) par rapport aux trois cours d'eau, le Wassoulou blé (F = 7), Kobla babla (F = 1) et Bla (F = 12).

L'indice de diversité de Shannon Weaver (H') indique que l'ensemble des taxons (macroinvertébrés) ont sensiblement la même abondance relative au sein du ruisseau Bla ($H' = 2.23$) désignant une communauté plus homogène par rapport aux autres cours d'eau, le Bagoé ($H' = 1,91$), le Wassoulou balé ($H' = 1,75$) et le Kobla babla ($H' = 0$).

L'indice d'équitabilité de Pielou (J) indique une meilleure répartition des taxons de la rivière Bagoé (J = 0,91) donc plus équilibré aux 3 autres cours, le Bla (J = 0,90), le Wassoulou Balé (J = 0,84) et le Kobla babla (J = 0).

L'EPT/C considéré comme le ratio entre les taxons polluosensibles (Ephéméroptère, Plécoptère, Trichoptère) et le taxon polluo-tolérant (Chironomidae), indique un large ratio de la rivière Bagoé (EPT/C = 3) par rapport aux 3 autres cours d'eau, le Wassoulou balé (EPT/C = 0), Kobla babla (EPT/C = 0), et Bla (EPT/C = 0). Cela nous montre une meilleure qualité des eaux de la rivière Bagoé en zone d'orpaillage par rapport aux autres eaux.

L'IBF de famille permettant de classer la qualité biologique des cours d'eau par rapport aux indices de référence d'Hilsenhoff (voir chapitre 1, paragraphe 6.3.3.1) nous indique une meilleure qualité biologique du ruisseau Bla (IBF = 5,76) et de la rivière Bagoé (IBF= 6,21) par rapport au Wassoulou balé (IBF = 7,29) et Kobla babla (IBF = 8).

Une analyse de ces résultats nous permet de constater que la rivière Bagoé et le ruisseau Bla ou l'on ne pratique pas la technique d'amalgamation et de cyanuration qui sont favorables au développement de la communauté de macroinvertébrés plus diversifiés, stables et équilibrés. La rivière Kobla Bla ou l'indice d'équitabilité $J < 60\%$ signe de perturbation majeure (Hadi,2017) est très du site de Kalako où la cyanuration et l'amalgamation sont fortement pratiquées.

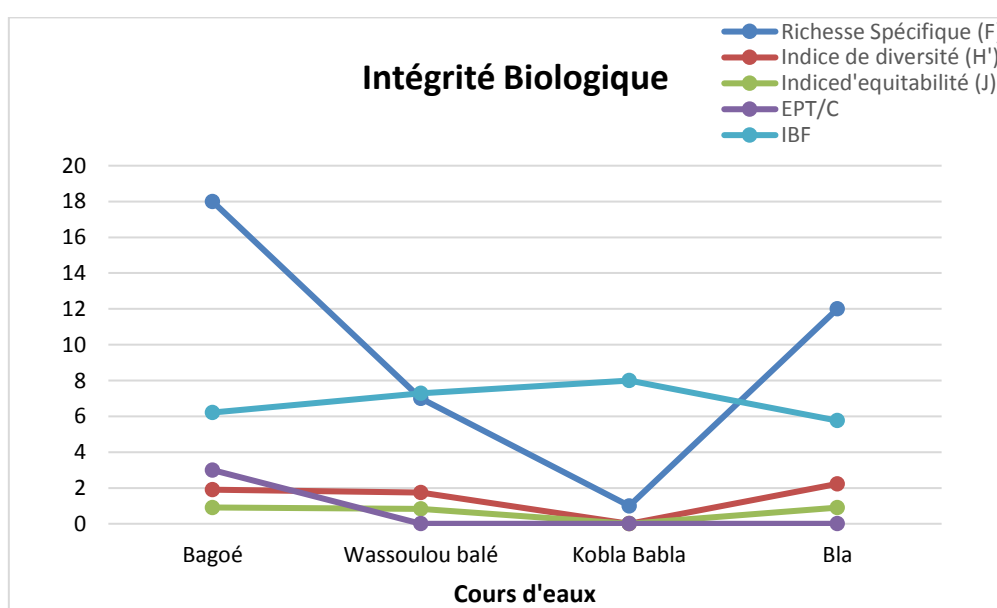


Figure 81:Intégrité biologique des cours d'eau en zone d'orpaillage.

4.1.1.2. Intégrité physico-chimique :

Afin de déterminer l'intégrité physico-chimique des 4 cours d'eau étudiés (Bagoé, Kobla babla, Wassoulou balé et Bla) en zone d'orpaillage, nous avons analysé les résultats obtenus. On constate un dépassement des normes de certains paramètres physico chimiques, substances indésirables et micropolluants tels que :

5. **La turbidité (Turb) :** à part la rivière Kobla babla, l'ensemble des trois autres cours d'eau présente un taux de turbidité élevé par rapport aux normes de la DCE (100 NTU). Cette forte turbidité pour ces cours d'eau est due à l'utilisation de cracheurs mobiles de fabrication artisanale par les orpailleurs et dont les résidus sont entraînés directement dans le lit de ces cours d'eau. On note l'absence de cracheur le long de la rivière Kobla babla.
6. **Le chrome (Cr) :** le taux de Cr pour l'ensemble des 4 cours d'eau est mauvais ;
- **Le mercure (Hg) :** Le taux de mercure mauvais que dans la rivière Kobla babla témoigne de l'utilisation à grande échelle de cette substance des orpailleurs du site de Farabacoura dans le traitement du minerai. En effet bien que le mercure soit naturellement présent dans l'environnement (roches des sous-sols), il est en grande partie, introduit par les activités anthropiques telles que le cas en Amérique du Sud par l'orpaillage (ASEF, 2007).
- **Le nitrite (NO₂⁻) :** la rivière Bagoé présente un mauvais taux en nitrite et cela est sûrement dû à la décomposition des matières organiques (débris ligneux) utilisées dans les activités d'orpaillage et la fragilisation des berges par les orpaillages entraînant l'effondrement des ligneux dans la rivière Bagoé formant des embâcles.

Le nitrite est toxique et fixe l'hémoglobine du sang chez les mammifères provoquant l'hémoglobinémie ou maladie bleu du nourrisson, il provoque également en milieu aquatique le stress chez les poissons (CPEPESC, 2017).
- **Le cyanure (CN) :** seule dans la rivière Bagoé on note un taux élevé de cyanure, cette présence du cyanure peut être liée aux activités d'orpaillage de la zone.
- **L'oxygène dissous (OD) :** le taux d'oxygène dans la rivière Kobla babla est très mauvais expliquant le quasi inexistant de toute forme de vie (richesse spécifique, F=1).

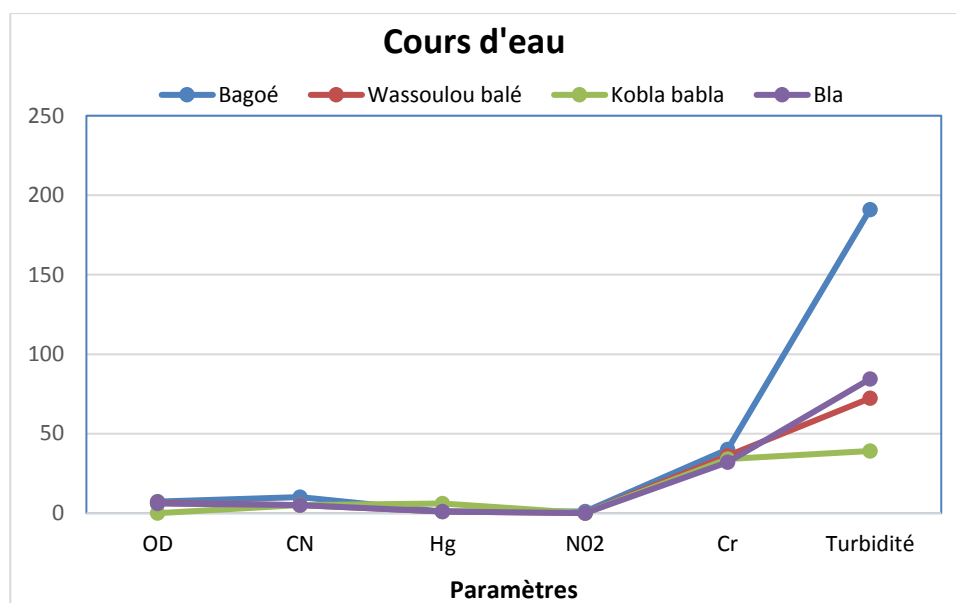


Figure 82: Intégrité physico-chimique des cours d'eau en zone d'orpaillage.

L'étude des indices biotiques et des paramètres physico-chimiques de l'ensemble des 4 cours d'eau en zone d'orpaillage (Kobla babla) classe la rivière Bagoé et le ruisseau Bla comme des eaux de qualité médiocre la rivière Wassoulou balé et le Kobala babla de très mauvaise qualité.

4.1.2. La rivière Bagoé en zone d'orpaillage et neutre (Année 2017 et 2018):

4.1.2.1. Intégrité biologique:

Les résultats issus de l'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques dans la rivière Bagoé en zone d'orpaillage (site de Massiogocoro, Massiogocoura et Alihamdoullilae) et en zone neutre comme référence (site de Niougoni) nous permet de tenir les commentaires qui suivent :

On constate une baisse de la richesse spécifique de 2016 (F=18) à 2017 (F = 12) et 2018 (F = 9). Comparé au site de référence de la rivière Bagoé, on note une nette supériorité de la richesse spécifique (F = 18) en 2018 en zone neutre qu'en zone d'orpaillage.

L'indice de diversité de Shannon (H') et d'équitabilité de Pielou (J) nous permet de définir une communauté de macroinvertébrés plus diversifiés stables, équilibrés en 2017 (H'= 2 et J=1) de la rivière Bagoé par rapport à l'année précédente 2016 (H' = 1,91 et J = 0,91) et en 2018 (H' =1,46 et J = 0,59) avec une dominance des familles tolérantes à la pollution durant les trois années.

Un rapport Ephéméroptère, Plécoptère, Trichoptère sur Chironomidae (EPT/C) de la rivière Bagoé meilleur en 2016 (EPT/C = 3) par rapport en 2017 (EPT/C = 0) et 2018 (EPT/C = 0)

tandis que le même en 2018, cette fois ci en zone neutre, nous indique un ratio bien meilleur aux trois années précédentes de la rivière Bagoé en zone d’orpaillage (EPT/C = 3,73).

On constate une détérioration de la qualité biologique de la rivière qui passe de médiocre en 2016 (IBF = 5,76) à mauvais en 2017 (IBF = 6,64) et 2018 (IBF = 6,28) et comparé au niveau du site de référence de la même rivière Bagoé en zone neutre, on note une eau de qualité assez bonne (IBF = 5,48).

L’indice global normalisé (IBGN) de 2018 classe la rivière Bagoé de mauvaise qualité en zone neutre (IBGN = 6) et de très mauvaise qualité en zone d’orpaillage (IBGN = 3).

L’année 2017 fut marquée par une intensification des activités d’orpaillage Bagoé avec l’arrivée des dragues dans le lit de la rivière et aussi l’ouverture de nouveaux sites d’orpaillage le long du Bagoé.

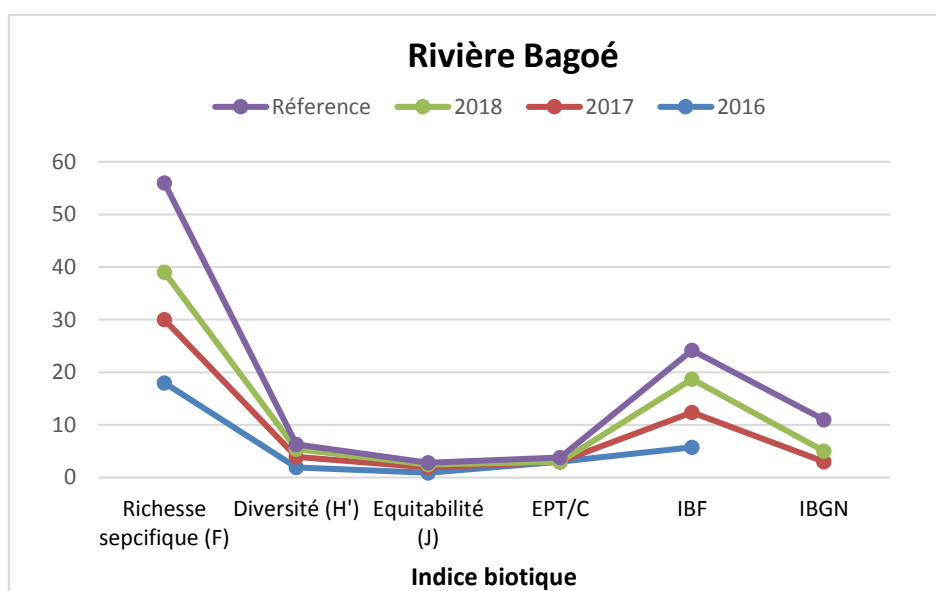


Figure 83: Intégrité biologique de la rivière Bagoé.

4.1.2.2. **Intégrité Physico-chimique:**

L’analyse des résultats de SGS Lab. Bamako par rapport à la qualité physico-chimique de la rivière Bagoé en zone d’orpaillage et neutre durant l’année 2017 et 2018 nous indique certains paramètres physiques, chimiques et substances toxiques au-dessus des normes (DCE, 2014) il s’agit de :

- **La turbidité (Turb):** la rivière Bagoé en zone d’orpaillage présente une forte turbidité en 2017 et 2018 et cela est due aux lessivages des résidus terribles de l’orpaillage le long des berges ainsi que les dragues opérantes dans le lit de la rivière.

Comparativement, la même rivière Bagoé présente une bonne turbidité en zone neutre déterminant l'impact de l'orpaillage sur la turbidité.

- **Le mercure (Hg):** la rivière Bagoé présente un mauvais niveau de mercure en zone d'orpaillage et cela à cause l'utilisation du mercure par les orpailleurs dans le processus de traitement des minerais pour une meilleure récupération de l'or
- **Le cyanure (CN):** on note une concentration en cyanure au-delà des normes de la DCE dans la rivière Bagoé en zone neutre.

La présence du cyanure peut être due aux activités antérieures (année 2017) d'orpaillage effectuées sur le site de Niougoni, des analyses plus poussées sur la sédimentation permettront de confirmer ces affirmations.

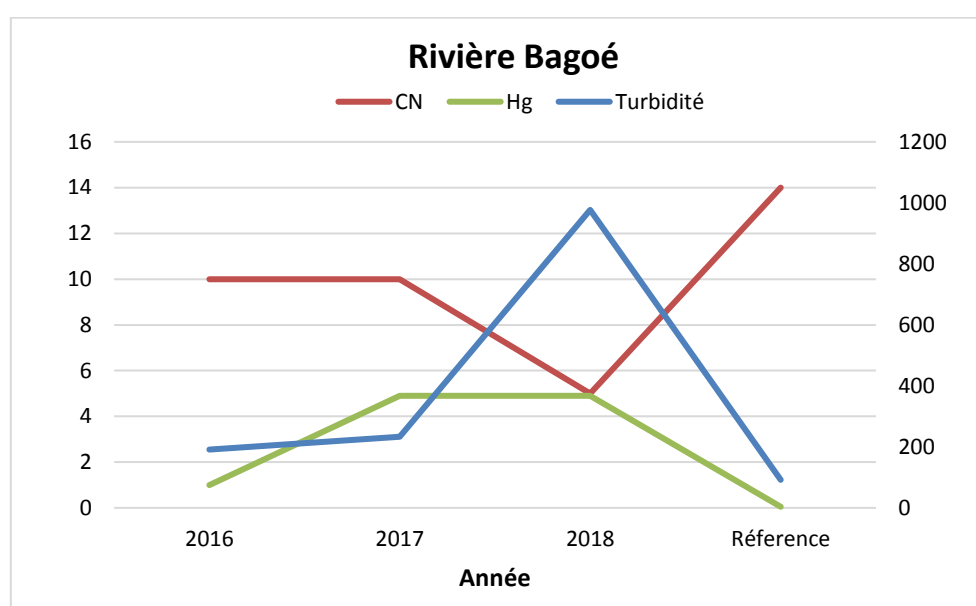


Figure 84: Evolution de l'intégrité physico-chimique de la rivière Bagoé.

4.1.3. Conclusion :

Durant les trois années (2016, 2017 et 2018) on remarque une dégradation progressive de la qualité biologique de la rivière Bagoé en zone d'orpaillage avec des paramètres physico-chimiques (turbidité, cyanure, mercure) au-dessus des normes standard et sont tous des éléments dont la présence peut être due aux activités anthropiques.

Ainsi la différence de qualité biologique et physico-chimique de la rivière Bagoé en zone neutre dont la qualité est meilleure, nous permet de confirmer l'impact négatif qu'engendre l'orpaillage sur la qualité des cours d'eau.

5. CONCLUSION ET RECOMMENDATIONS:

Au cours de cette étude, 526 individus de macroinvertébrés benthiques ont été échantillonnés au sein de 4 cours d'eau (Bagoé, Wassoulou bale, Kobla babla et Bla) et se répartissent en 32 familles composées à 79% d'insectes, 11% de mollusque, 5% de crustacés et 5% d'oligochètes. Le calcul des indices écologiques indique une richesse familiale (F) allant [1 à 18] selon les cours d'eau pour l'ensemble, l'indice de Shannon (H') de [0 à 2], l'indice d'équitabilité de Pielou (J) de [0 à 0,91], l'indice biotique de famille d'Hilsenhoff (IBF) varie de [5,13 à 8], le rapport EPT/C [0 à 3] et l'indice biotique globale normalisé (IBGN) [3 à 6].

L'analyse physico-chimique des 4 cours d'eau indique des paramètres (CN, Hg, Turbidité, Cd, Cr) au-dessus des normes de référence de qualité biologique (IBGN,2004).

L'analyse canonique de correspondance (ACC) indique une corrélation positive entre le taux de turbidité de la rivière Bagoé et l'abondance relative des familles de macroinvertébrés (les Gammaridae, les Hydrophilidae, les Notonectidae et les Lestidae) de la même rivière. Une corrélation positive entre la demande biologique en oxygène (DBO₅) et l'abondance relative et la famille des Coenagrionidae et des Lymnaeidae dans la rivière Wassoulou balé. Une corrélation positive entre le Manganèse (Mn) et l'abondance relative des Spheridae dans la rivière Kobla babla et corrélation entre le mercure (Hg) et l'abondance relative de la famille des Corixidae (Co) et des Petaluridae (Pet) et le mercure (Hg).

L'ensemble de ces résultats nous permet de confirmer l'évaluation des risques réalisée en amont démontrant l'impact effectif de l'orpaillage sur la qualité écologique des cours dans la région de Sikasso et dont le degré de dégradation dépend fortement de la gravité de la technique utilisée pour le traitement des minerais : mauvaise qualité pour la technique de la concentration gravitaire et très mauvaise pour la cyanuration et l'amalgamation.

Bien que l'orpaillage de l'or contribue à l'amélioration des conditions de vie et crée de l'emploi, il constitue une menace imminente pour la sauvegarde de nos écosystèmes.

Les différentes parties prenantes (gouvernement, orpailleurs, communauté locale) doivent consentir plus d'efforts pour une meilleure structuration de l'orpaillage au Mali afin de le rendre formelle. Par rapport à la protection de l'environnement des programmes et projets doivent être mises en œuvre par le gouvernement à savoir :

- L'ouverture de couloirs d'orpaillage qui permettront de mieux cadrer le déplacement et les perturbations causées par l'activité sur l'environnement

CONCLUSION & RECOMMENDATIONS

- Exiger une étude d'impact environnemental pour l'ensemble des couloirs d'orpaillage ;
- Un suivi régulier et constant des autorités locales en charge de la protection de l'environnement (qualité de l'eau, qualité de l'air) et de la santé publique ;
- Initiation de projet de réhabilitation des anciens sites d'orpaillage ;
- La formation et la sensibilisation des parties prenantes sur les dangers liés aux activités d'orpaillage ;
- Rendre le port des équipements de protection individuelle obligatoire pour les orpailleurs ;
- La création d'autres activités génératrices de revenus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **AFNOR, 1992:** Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN). NF T 90-350. Association Française de Normalisation, Paris.
2. **Auber, 1976 :** Atlas des Coléoptères de France. Deux tomes, 4 me edition Société nouvelle des Editions Boubee, Paris, 535. p.
3. **Association Santé Environnement France, 2007 :** Les Métaux lourds, le Synthèse de ASEF.
4. **Baranu.D et Perez.T, 2010 :** Bioindicateurs-Biomarqueurs, Notes de cours.
5. **Barbour et al, 1999:** Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers.
6. **Bouchet R.J, 1963:** Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. IAHS Publ, 62, 134-142.
7. **Bremond R. et Vuichard R. (1973).** Paramètres de la qualité des eaux, OSPEPE, Paris.
8. **Casquet. T, 2012 :** Des invertébrés pour la bioindication de la qualité des cours d'eau : bilan et perspectives.
9. **Chabot.V, 2014 :** Les facteurs de sélection des bioindicateurs de la qualité des écosystèmes aquatiques : Elaboration d'un outil d'aide à la décision.4,
10. **Chambre des Mines du Mali (CMM), 2017:** Termes de référence du programme d'action pour la protection et la restauration des écosystèmes de la région de Sikasso.
11. **China & Usinger, 1949:** Classification of the Vellidae with a new genus from south Africa Am.Mag.nat.Hist, 12, 2:343.
12. **Claire Mainguy, 2011.**
13. **Claude & Arnaud, 2013:** Analyse des eaux, **P.13.**
14. **Denis, 2001:** Etude des macroinvertébrés benthiques et l'alimentation d'espèces de poissons en relation avec le rétrécissement saisonnier de la superficie d'eau du lac de barrage de la Comoé, **6-17. p.**
15. **Déjoûx, Elouard, Forge et Maslin, 1981:** Catalogue iconographique des insectes aquatiques de Côte d'Ivoire. ORSTOM. **P. 42, 178.**
16. **Déjoûx, Lauzanne et Lévêque, 1969:** Evolution qualitative et quantitative de la faune benthique dans la partie est du lac Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol, **P. 3-58.**
17. **Daget, J et al, 1992 :** Faune des poissons d'eaux douces et saumâtres d'Afrique de l'Ouest. Tome 2. Edition ORSTOM/MRAC. **792. p.**

18. **Daget J. 1954** : Les poissons du Niger supérieur. Mémoire, IFAN, 36, Dakar, **391 p.**
19. **Davies & Jackson, 2006**: The biological condition gradient a descriptive model for interpreting change in aquatic ecosystems.
20. **Direction Nationale des Eaux et Forêts, 2009**: Quatrième rapport sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique. 17.p.
21. **Gaujous D. (1997)**. La pollution des milieux aquatiques, aide-mémoire, **40-184p**, Paris.
22. **Gauthier Nathalie, 1996** : L'impact des polluants métalliques (As, Pb, Hg) sur les invertébrés benthiques, **P.18.**
23. **Gnohossou, 2006** : La faune benthique d'une lagune ouest Africaine (le lac Nokoue au Bénin), diversité, abondance, variations temporelles et spatiales, place dans la chaîne trophique.
24. **Gertrude Marie Mathilda COULIBALY, 2013**: L'évaluation environnementale et analyse des risques dans le domaine de l'exploitation minière : les conséquences du non-respect des obligations environnementales.
25. **Hilsenhoff, W. L. 1982**. Using a biotic index to evaluate water quality in streams. Technical Bulletin Wisconsin Department of Natural Resources 132.
26. **Hilsenhoff, W. L. 1987**. An improved biotic index of organic stream pollution. Great Lakes Entomologist 20. **P. 31-39.**
27. **Hilsenhoff, W. L. 1988**. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index.
28. **Illis J, 1955**: Steinfliegen oder Plecoptera Die Tierwelt Deutschlands und der angrenzenden mereteile. Teil 43. Veb Gustav Fischer Verlag. Iena 150p.
29. **INSTAT, 2012**: Recensement général de la population et de l'habitat du Mali (RGPH 2009).
30. **IRSTEA, 2011** : Écotoxicologues et bioindication des milieux aquatiques.
31. **J. Guigues et P. Devismes, 1969** : La prospection minière à la batée dans le massif armoricain, (Mémoires du B.R.G.M. N°71, 1969).
32. **Karr et al, 1986**
33. **Kazi et al, 2009**: Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. (www.scribd.com/document/300067315/Manchar-Kazi-et-al-2009).
34. **Maoui, 2007**: Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de

Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise. Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, Algérie. 249p.

35. **MDDEP, 2011:** Protocole d'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques d'eau douce du Québec, Cours d'eau peu profonds a substrat meuble, Direction du suivi de l'environnement, MDDEP, **39p.**
36. **Melquiot.P, 2008 :** Normes AFNOR pour la biosurveillance de l'environnement
37. **Ministère de l'Environnement et du Développement Durable Française, 2003 :** Système d'évaluation la qualité de l'eau des cours d'eau (grilles d'évaluation, seq-eau. version 2).
38. **Ministère des Mines du Mali (MMM), 2009:** Annuaire statistique du secteur des mines et géologies.
39. **Ministère des Mines du Mali (MMM), 2012:** Code Minier. **1-3p.**
40. **Office québécois de la langue française, 2012 :** Grand dictionnaire terminologique.
41. **PADELIA-Mali, 2010.** Recueil des textes nationaux régissant l'environnement au Mali. Tome1. **50p.**
42. **Parlement européen et du Conseil, octobre 2000.** Directive 2000/60/CE, 2000.
43. **Plafkin and al, 1989.** Rapid Bioassessment Protocols for use in Streams and Rivers: Benthic Macroinvertebrates and Fish. U.S. Environmental Protection Agency. EPA 440/4-89/001. 8 chapters, Appendices A-D.
44. **PNUD&PNUE, 2008 :** Evaluation économique de la gestion environnementale au Mali (Cout et bénéfice).
45. **Pielou E.C, 1977:** Mathematical ecology. 2nd ed. John Wiley, Wiley-Interscience, Toronto, **385 p.**
46. **Rani Parker, Fred Wood, 2006.** Tresor cache, **21p.**
47. **Rejsek.F, 2002 :** Analyse des eaux, Aspects réglementaires et techniques. Série Sciences et technique de l'environnement. **360p.**
48. **Saad, 1970 :** Etude hydrogéologique du sud du Mali. **P.4.**
49. **SANOGO.Y et al ,2015 :** Diversité du peuplement ichthyologique de la rivière Bagoé (Bassin du Niger, Mali).
50. **Shannon C. E. & Weaver W, 1963:** The mathematical theory of communications, Univ. Illinois, Urbana, 117 pp.
51. **Seydou Keita, 2001 :** Etude sur les mines artisanales et l'exploitation minière à petite échelle au Mali.

REFERENCES

52. **Simpson, 1949:** Measurement of diversity, Nature, P.163.
53. **Turken et Kozanci, 2010:** Application of various bioersivity indices to benthic macroinvertebrate assemblages in streams of a national park in Turkey.
54. **(U.S. EPA), 2002:** Biological assessments and criteria, EPA 822-F-02-006, été 2002.
55. **Wendmi Raoul florentin Sorgho, 2007 :** Evaluation environnementale et sociales des sites d'orpaillage et stratégie de compensation.
56. **Gueroui Y., 2015 :** Caractérisation hydrochimique et bactériologique des eaux souterraines de l'aquifère superficiel de la plaine de Tamlouka (Nord-Est Algérien).24p.

WEBOGRAPHIE

https://fr.wikipedia.org/wiki/Cancer_pagurus
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Ephemeridae>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Ephemerellidae>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pleidae>
<https://en.wikipedia.org/wiki/Naucoridae>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Molannidae>
https://www.google.fr/?gws_rd=ssl#q=famille+gammare
http://www.instat-mali.org/contenu/rgph/raurb09_rgph.pdf
https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gion_de_Sikasso
http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/GuidetechniqueREEE-ESC_30mars2009.pdf
<http://www.hypergeo.eu/spip.php?article29>
<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre4/chapitre4.html>
<http://www.memoireonline.com/01/12/5099/L-impact-de-l-exploitation-artisanale-de-l-or-cas-du-site-de-Fofora-dans-la-province-du-Poni.html>
http://www.oss-online.org/cd_GICRESAIT/doc/rapport_sait/3-Synthese_Hydro-climatologique.pdf
<http://mon.univmontp2.fr/claroline/backends/download.php?url=LzVMMi1FdmFwZW5saWduZS5wZGY%3D&cidReset=true&cidReq=FLST403>
<http://www.hydrologie.org/MISC/hydr/fletpmth.htm>
<http://www.osi-ecologis.org/QUALITE-DES-EAUX-DE-CONSOMMATION.html>
http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Eau%202
<http://www.thewatershed.org/pdf/Science/Resources/Hilsenhoff%20FTV.pdf>
https://fr.wikipedia.org/wiki/Macroinvert%C3%A9s_benthiques_dulcicoles

REFERENCES

www.gac.ca/LesSciencesDeLaTerrePourTous/ Sa Majesté la Reine du chef du Canada 2007.

<https://bijoux-cash.fr/infos/quels-sont-les-types-de-sols-contenant-de-lor.html>

http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i34019_001.pdf

https://www.hrw.org/sites/default/files/reports/mali1211fr_forinsertLR.pdf

http://www.sifee.org/static/uploaded/Files/ressources/actes-des-colloques/lome/session-3-3/COULIBALY_TEXTE.pdf

http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=241

<http://lakes.chebucto.org/ZOOBENTH/BENTHOS/tolerance.html#Gastropoda>

<http://www.waterbugkey.vcsu.edu/php/familydetail.php?idnum=9&f=Nepidae&ls=adult>

<http://www.asef-asso.fr/production/les-metaux-lourds-la-synthese-de-lasef/>

ANNEXE :

Annexe 1: Illustrations de quelques familles de macroinvertébrés benthiques identifiées dans les cours d'eau dans la région de Sikasso.



Illustration 12:Naucoridae (photo personnelle).



Illustration 13:Libellulidae (photo personnelle).



Illustration 14:Gammaridae (photo personnelle).



Illustration 15:Hydrophilidae (photo personnelle).



Illustration 16:Pleidae (photo personnelle).



Illustration 17:Haliplidae (photo personnelle).



Illustration 18:Elmidae (photos personnelles).



Illustration 19:Spheridae (photo personnelle).



Illustration 20:Lymneidae (photo personnelle).



Illustration 21:Notonectidae (photo personnelle).

Annexe 2:

Tableau 43: Méthodes d'analyse du laboratoire SGS Bamako.

PARAMETRES	UNITES	METHODE
NO ₃	mg/L	APHA ed 21th2005,4500
NO ₂	mg/L	APHA ed 21th2005,4500
DBO5	mg/L	APHA 5210B, 22ND EDITION
DCO	mg/L	APHA 5210B, 22ND EDITION
P Total	mg/L	APHA ed 21th2005,4500
TSS	mg/L	APHA 2540B, 22ND EDITION
Cl	mg/L	APHA4500CLG
Fe	mg/L	APHA3120B, 22ND EDITION
As	mg/L	EPA200.8
Cd	mg/L	EPA200.8
Cu	mg/L	EPA200.8
Pb	mg/L	EPA200.8
Mg	mg/L	EPA200.8
Zn	mg/L	EPA200.8
Hg	mg/L	EPA200.8
Cr	mg/L	EPA200.8
SO ₄	mg/L	APHA ed 22 nd 2011, 4500
Cn	mg/L	APHA450CNCE, 22ND EDITION
Turbidité (Turb)	NTU	APHA2130, 22DN EDITION
DO	mg/L	APHA4500OG, 22ND EDITION

Annexe 3 :

Tableau 44:Détermination du groupe faunique (IBGN).

Taxons	>50	45 à 49	41 à 44	37 à 40	33 à 36	29 à 32	25 à 28	21 à 24	17 à 20	13 à 16	10 à 12	7 à 9	4 à 6	1 à 3
Classe de variété	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Tableau 45:Détermination du groupe faunistique indicateur (IBGN).

Taxons	Chloroperlidae Perlidae Perlodidae Taeniopterygidae	Capniidae Brachycentridae Odontoceridae Philopotamidae	Leuctridae Glossosomatidae Beraeidae Goeridae Leptophlebiidae	Nemouridae Lepidostomatidae Sericostomatidae Ephemeridae	Hydroptilidae Heptageniidae Polymitarcidae Potamanthidae
G.F.I	9	8	7	6	5
Taxons	Leptoceridae Polycentropodidae Psychomyidae Rhyacophilidae	Limnephilidae Hydropsychidae Ephemerellidae Aphelocheiridae	Baetidae Caenidae Elmidae Gammaridae Mollusques	Chironomidae Asellidae Achètes Oligochètes	
G.F.I	4	3	2	1	

Annexe 4 :

Tableau 46:Indices de Reference Biologique de la DCE,2004.

Classe d'aptitude	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
MATIERES ORGANIQUES OXYDABLES					
Oxygène dissous (mg/l O ₂)	8	6	4	3	
Taux de saturation en oxygène (%)	90	70	50	30	
DBO ₅ (mg/l O ₂)	3	6	10	25	
DCO (mg/l O ₂)	20	30	40	80	
Carbone organique (mg/l)	5	7	10	15	
NH ₄ ⁺ (mg/l NH ₄)	0,5	1,5	4	8	
NKJ (mg/l N)	1	2	6	12	
MATIERE AZOTEES HORS NITRATES					
NH ₄ (mg/l NH ₄)	0,1	0,5	2	5	
NKJ (mg/l N)	1	2	4	10	
NO ₂	0,03	0,3	0,5	1	
NITRATES					
Nitrates (mg/l NO ₃)	2				
MATIERES PHOSPHOREES					
PO ₄ (mg/l PO ₄)	0,1	0,5	1	2	
PO ₄ (mg/l PO ₄)	0,05	0,2	0,5	1	
Chlorophylle a + phéopigments (µg/l)	10	60	120	240	
Taux de saturation en O ₂	110	130	150	200	
PH	8,0	8,5	9,0	9,5	
PARTICULES EN SUSPENSION					
MES (mg/l) 25 50 100 150	25	50	100	150	
Turbidité (NTU)	15	35	70	100	
Transparence SECCHI (cm)	200	100	50	25	
TEMPERATURE					
Température (°C)					
1ère catégorie piscicole	20	21,5	25	28	
2nde catégorie piscicole	24	25,5	27	28	
ACIDIFICATION					
pH Min MAX	6,5	6,0	5,5	4,5	
MICROPULLUANTS MINERAUX SUR EAU BRUTE					
Arsenic (µg/l)	1	10	100	270	
Cadmium (µg/l)					
Dureté faible	0,001	0,01	0,1	0,37	
Dureté moyenne	0,004	0,04	0,37	1,3	
Dureté forte	0,009	0,09	0,85	3	

ANNEXE

Chrome total (µg/l)					
Dureté faible	0,001	0,01	0,1	0,37	
Dureté moyenne	0,004	0,04	0,37	1,3	
Dureté forte	0,009	0,09	0,85	3	
Chrome total (µg/l)					
Dureté faible	0,04	0,4	3,6	70	
Dureté moyenne	0,18	1,8	18	350	
Dureté forte	0,36	3,6	36	700	
Cuivre (µg/l)					
Dureté faible	0,017	0,17	1,7	5	
Dureté moyenne	0,1	1	10	15	
Dureté forte	0,27	2,7	27	40	
Cyanures libres (µg/l)	0,02	0,2	2	240	
Mercure (µg/l)	0,007	0,07	0,7	3	
Plomb (µg/l)					
Dureté faible	0,23	2,3	23	52	
Dureté moyenne	0,43	4,3	43	98	
Dureté forte	1,4	14	140	330	
Zinc (µg/l)					
Dureté faible	0,23	2,3	23	52	
Dureté moyenne	0,43	4,3	43	98	
Dureté forte	1,4	14	140	330	