

Groupes fonctionnels des assemblages de poissons en fonction de l'indice de charge de pollution dans trois (3) zones d'exploitation minière (TORTIYA, HIRE et LAUZOUA) de la Côte d'Ivoire

Abié Patrick ANI*, Koffi Mexmin KONAN, Julie Estelle NIAMIEN-EBROTTIE, Oi Edia EDIA et Mamadou OUATTARA

Université NANGUI ABROGOUA, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Laboratoire d'Environnement et de Biologie Aquatique (LEBA), 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

(Reçu le 29 Janvier 2024 ; Accepté le 11 Mars 2024)

* Correspondance, courriel : abiepatrickani@yahoo.fr

Résumé

La présente étude vise à identifier les groupes fonctionnels des assemblages de poissons dans trois zones d'exploitations minières (exploitations de l'or, du manganèse et du diamant) sur la base de traits fonctionnels. Deux fonctions biologiques (l'acquisition des ressources et la locomotion) clés ont été choisies pour la formation des groupes fonctionnels. 10, 11 et 14 groupes fonctionnels respectivement dans la zone aurifère (HIRE), manganifère (LAUZOUA) et diamantifère (TORTIYA) ont été observés. Les groupes fonctionnels formés par une seule espèce dans les trois zones minières sont : Les groupes fonctionnels I (*Polypterus endlicheri*), II (*Clarias anguillaris*), III (*Synodontis bastiani*), X (*Labeo parvus*) et XIII (*Labeo senegalensis*) dans la zone diamantifère. Concernant la zone aurifère, ce sont : les groupes fonctionnels I (*Synodontis schall*), III (*Enteromius macrops*), VI (*Heterobranchus isopterus*) et IX (*Coptodon hybride*). Au niveau de la zone manganifère, ce sont : *Heterobranchus isopterus*, *Papyrocranus afer*, *Polypterus endlicheri* et *Clarias buettikoferi*. L'indice de redondance fonctionnel (IRF = 3,22) est significativement plus élevé dans la zone aurifère. Les individus des groupes fonctionnels XIV (*Synodontis schall*, *Synodontis punctifer*, *Auchenoglanis occidentalis* et *Chrysichthys maurus*), VIII (*Hemichromis bimaculatus*, *Hemichromis faciatus*, *Oreochromis niloticus*, *Coptodon zillii* et *Chromidotilapia guntheri*) et VII (*Chrysichthys maurus*, *Chrysichthys nigrodigitatus*, *Synodontis schall*) respectivement dans la zone diamantifère, aurifère et manganifère augmentent avec l'indice de pollution. Cette étude contribuera à la gestion et à la conservation des ressources halieutiques des zones minières.

Mots-clés : *traits fonctionnels, groupes fonctionnels, Indice de redondance fonctionnel, exploitation minière, eau douce.*

Abstract

Functional groups of fish assemblages according to pollution load index in three (3) mining zones (TORTIYA, HIRE and LAUZOUA) of Ivory Coast

The aim of this study is to identify the functional groups of fish assemblages in three mining areas (gold, manganese and diamond mining) on the basis of functional traits. Two key biological functions (resource acquisition and locomotion) were chosen to form the functional groups. 10, 11 and 14 functional groups were observed in the gold (HIRE), manganese (LAUZOUA) and diamond (TORTIYA) zones respectively. The functional groups formed by a single species in the three mining zones are : Functional groups I (*Polypterus endlicheri*), II (*Clarias anguillaris*), III (*Synodontis bastian*), X (*Labeo parvus*) and XIII (*Labeo senegalensis*) in the diamond zone. In the gold zone, these are functional groups I (*Synodontis schall*), III (*Enteromius macrops*), VI (*Heterobranchus isopterus*) and IX (*Coptodon hybride*). In the manganimifere zone, these are : *Heterobranchus isopterus*, *Papyrocranus afer*, *Polypterus endlicheri* and *Clarias buettikoferi*. The functional redundancy index (IRF= 3.22) is significantly higher in the gold zone. Individuals from functional groups XIV (*Synodontis schall*, *Synodontis punctifer*, *Auchenoglanis occidentalis* and *Chrysichthys maurus*), VIII (*Hemichromis bimaculatus*, *Hemichromis faciatus*, *Oreochromis niloticus*, *Coptodon zillii* and *Chromidotilapia guntheri*) and VII (*Chrysichthys maurus*, *Chrysichthys nigrodigitatus* and *Synodontis schall*) in the diamond, gold and manganimifere zones respectively increase with the pollution index. This study will contribute to the management and conservation of the fish resources of the mining areas.

Keywords : *functional traits, functional groups, functional redundancy index, mining, freshwater.*

1. Introduction

La Côte d'Ivoire, dont l'économie a longtemps reposé sur l'agriculture, est désormais tournée vers l'exploitation de son sous-sol. Cette initiative a permis l'installation d'une industrie minière grandissante qui constitue une source de diversification de l'économie de la Côte d'Ivoire. Dans ce contexte, plusieurs autorisations d'exploitation minière sont accordées. Le développement de ce secteur d'activité est jugé par les uns comme un facteur positif au plan des retombées socio-économiques ; en revanche, il est mal vu par d'autres pour ses impacts environnementaux négatifs [1], en particulier dans les régions peu développées où vivent des communautés autochtones dont une partie du mode de vie dépend de l'intégrité écologique des terres et les eaux desquelles elles tirent leur existence [2]. Compte tenu des menaces potentielles des activités minières sur la santé des écosystèmes aquatiques, il apparaît nécessaire d'en comprendre les mécanismes, et d'envisager les dispositions adéquates pour protéger les organismes qui y vivent, y compris les êtres humains. C'est dans cette optique, la présente étude s'intéresse à 3 zones d'exploitation minière à savoir : TORTIYA, HIRE et LAUZOUA, caractérisées respectivement par une production de diamant, d'or et de manganèse. Pour l'heure, les travaux scientifiques effectués dans ces trois (3) zones concernent majoritairement la physico-chimie de l'eau. Ce sont en occurrence les études réalisées à HIRE [3, 4], LAUZOUA [5] et à TORTIYA [6]. A ce jour, aucune étude sur la qualité écologique des eaux basée sur les organismes qui y vivent, notamment sur la diversité fonctionnelle des poissons, n'a encore été effectuée. Cependant, la dégradation de la biodiversité, notamment fonctionnelle, perturbe l'équilibre de l'écosystème et par conséquent met en péril les nombreux biens et services qu'ils procurent [7]. Plusieurs auteurs admettent que la diversité fonctionnelle traduit mieux la relation biodiversité-fonctionnement de l'écosystème que la richesse spécifique [8, 9]. La diversité fonctionnelle permet d'assembler en groupe fonctionnel les espèces [10]. Les groupes fonctionnels peuvent être vus sous différentes « facettes », selon que les groupes sont

définis comme un ensemble d'espèces présentant une réponse similaire aux conditions environnementales ou ayant des effets similaires dominants sur les processus écosystémiques [11]. L'une des premières étapes consiste à classer les espèces par similarités fonctionnelles [8, 10]. Cette classification permet de regrouper les espèces en groupe fonctionnel monospécifique (une seule espèce dans le groupe fonctionnel) et multispécifique (plus de deux espèces dans le groupe fonctionnel). Les espèces des groupes fonctionnels monospécifiques sont les plus importantes d'un point de vue fonctionnel [7]. Ceci implique que chaque espèce contribue au fonctionnement de l'écosystème d'une manière unique. Par conséquent, la perte de ces espèces entraînerait un changement notable dans le fonctionnement et la stabilité de l'écosystème [12]. Ces groupes fonctionnels monospécifiques sont plus vulnérables [13]. Car les fonctions assurées par les espèces de ces groupes sont plus susceptibles de disparaître sous certaines pressions anthropiques sans aucune chance d'être compensées par d'autres. Ainsi, ces espèces de ces groupes monospécifiques sont essentielles pour maintenir certains aspects du fonctionnement de l'écosystème. C'est dans ce contexte la présente étude a pour objectif d'identifier les groupes fonctionnels des assemblages de poissons dans trois zones d'exploitations minières (exploitations de l'or, du manganèse et du diamant) sur la base de traits fonctionnels, et mettre en relation ces groupes fonctionnels et l'indice de charge de pollution, afin de contribuer à la mise en œuvre d'un plan de conservation et protection du peuplement ichthyologique des zones considérées.

2. Matériel et méthodes

2-1. Zones d'étude

TORTIYA est une zone diamantifère, située sur une colline dans la région du Hambol, à 47 kilomètres de Niakaramandougou et à environ 100 kilomètres au sud de la ville de Korhogo. Les coordonnées géographiques de cette zone sont 8°46'0" N et 5°40'60" W [14]. HIRE appartient à la région du Lôh-Djiboua. Elle se trouve sur l'axe Divo-Oumé, à 45 km de Divo et à 29 km d'Oumé. Cette ville est située entre 05°18'000 et 05°16'500 de longitude ouest et entre les 06°12'200 et 06°10'500 de latitude nord [3]. LAUZOUA se trouve au Sud de la Côte d'Ivoire dans la région de Lôh-Djiboua, précisément dans le département de Guitry. Les coordonnées géographiques de cette zone sont 5°19' 0 et 5°12' N. Cette ville présente en son sein une mine industrielle de manganèse. Il s'agit de l'ex-mine de « Mokta » [15].

2-2. Sites d'échantillonnage

Le choix des sites d'échantillonnage a été guidé par la permanence en eau, leur accessibilité relativement aisée en toutes saisons, le degré de perturbation par les activités minières et d'autres types d'activités anthropiques. Les descriptions et les coordonnées géographiques des stations de ces trois zones minières ont été faites selon la méthodologie proposée [16].

2-3. Collecte des données

2-3-1. Collecte des sédiments

Plusieurs métaux lourds ont été dosés à savoir : le zinc, le manganèse, le nickel, le mercure, le plomb, l'arsenic, le fer, le chrome, le cyanure, le cuivre et l'aluminium. Le choix de ces métaux lourds a été guidé par leur impact négatif sur la qualité de l'eau, les sédiments et la communauté de poissons [17]. Seuls les métaux lourds (plomb, manganèse, fer, cadmium et mercure) qui avaient une teneur dépassant les valeurs seuils tolérées dans les différents milieux aquatiques ont été retenues pour les analyses.

2-3-2. Collecte des poissons

Des filets maillant de différentes mailles (9, 10, 15, 20, 26, 30, 35, 40 et 45 mm de côté) et des épuisettes (25 cm de diamètre d'ouverture et 2 mm de vide de maille) ont été utilisés pour les pêches expérimentales. Pour ce faire, les filets sont posés entre 16 et 17 h, puis relevés le lendemain à 07 h à toutes les stations prospectées. L'analyse des poissons a commencé par l'identification et le dénombrement des spécimens qui composent les échantillons. L'identification des taxons a été faite à l'aide des clés proposées par [18] et des révisions systématiques disponibles sur le site www.fishbase.org. Chaque spécimen a été pesé et mesuré (longueur totale et longueur standard).

2-3-3. Analyse morpho-anatomique des poissons

Dans cette analyse 37, 26 et 27 espèces respectivement dans la zone diamantifère, aurifère et manganifère ont été manipulées [16]. Plusieurs mensurations ont été prises sur les différents spécimens de poissons capturés sur la base des informations trouvées dans la littérature [10, 19]. Dans le cadre de notre étude, 17 mesures ont été prises, dont 16 mesures morphologiques et 1 mesure anatomique sur 30 spécimens adultes de chaque espèce si possible (**Figure 1**). Ce choix relativement aléatoire a porté sur des individus en bon état physique avec une bonne intégrité des nageoires et les individus de taille similaire [20]. Pour effectuer ces mesures, deux fonctions clé ont été choisies [21]. Il s'agit des fonctions de l'acquisition de la nourriture et la locomotion.

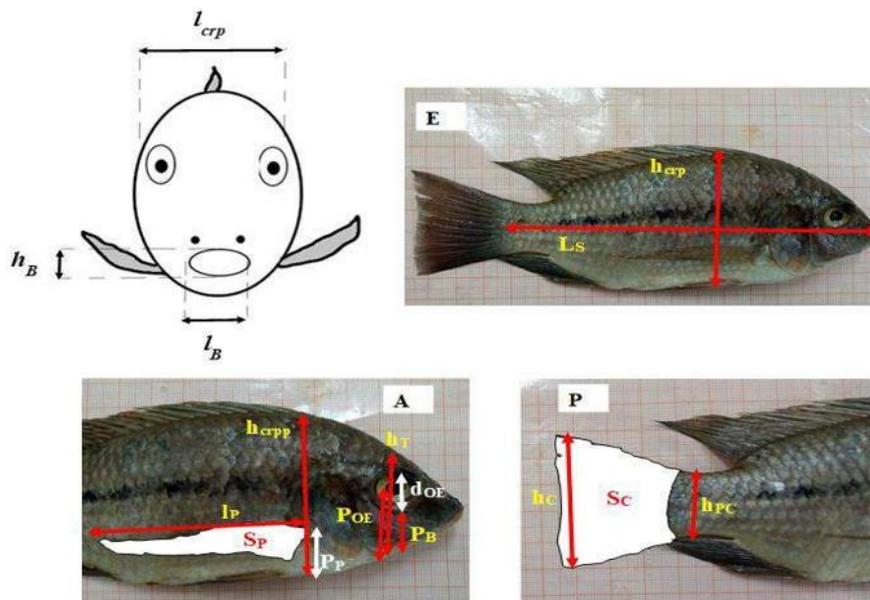


Figure 1 : Mesures morphométriques sur une photographie d'un spécimen de *Sarotherodon galilaeus* capturé dans la zone diamantifère

l_{crp} = largeur maximale du corps ; h_B = hauteur de la bouche ; l_B = et la largeur maximale de la bouche ; E = photo du poisson ; A = partie antérieure ; P = partie postérieure ; l_s = longueur standard ; h_{crp} = hauteur maximale ; h_{pc} = hauteur minimale du pédoncule caudal ; h_c = hauteur maximale de la nageoire caudale ; S_c = surface de la nageoire caudale ; l_p = longueur maximale de la nageoire pectorale ; S_p = la surface de la nageoire pectorale ; h_{crpp} = hauteur du corps à la verticale de l'insertion de la nageoire pectorale ; P_p = hauteur entre la base inférieure du corps et le point supérieur d'insertion de la nageoire pectorale ; d_{OE} = diamètre maximum de l'œil ; h_T = hauteur de la tête ; P_{OE} = hauteur entre le centre de l'œil et la base inférieure du corps ; P_B = distance verticale entre le point de jonction des deux mâchoires et le point le plus bas situé à la même verticale.

2-3-4. Calcul des traits fonctionnels

Après les différentes mesures prises sur les poissons, les mesures ont été convertir en trait fonctionnels. Cinq (5) traits fonctionnels ont été décrits pour l'acquisition de la nourriture et 10 traits fonctionnels pour la locomotion. Concernant l'acquisition de la nourriture, la bouche est décrite par sa forme (*Fbo*), sa surface relative par rapport à la section du corps (*Sbo*) et sa position verticale sur la tête (*Pbo*). L'œil (*Trø*) est décrit par la taille relative par rapport à la hauteur de la tête. Enfin, la longueur du tube digestif (*Ltd*) est comparée à la longueur standard du corps. Pour la locomotion, les traits fonctionnels regroupent le poids (*m*), la position verticale de l'œil sur la tête (*Pdo*), la forme (*Ftc*) et la surface relative (*Stc*) de la section du corps ; la position verticale (*Pnp*) et la forme (*Fnp*) de la nageoire pectorale ; L'étranglement du pédoncule caudal (*Epc*) ; la forme de la nageoire caudale (*Fnc*) et enfin le ratio entre les surfaces des nageoires pectorales, de la nageoire caudale (*Rsn*) et leur surface totale comparée à la section du corps (*Stn*). Tous ces calculs ont été possibles grâce à la méthodologie proposée par plusieurs auteurs [21].

2-3-5. Formation des groupes fonctionnels

L'une des premières étapes consiste à classer les espèces par similarités fonctionnelles [8, 10]. La classification des espèces en groupes fonctionnels nécessite quatre étapes [22] : (i) établir un critère d'inclusion (c'est-à-dire définir la communauté biologique) : dans cette étude, tout l'assemblage de poisson ; (ii) choisir des fonctions clés : la locomotion et l'acquisition de la nourriture ont été retenues ; (iii) choisir les traits fonctionnels appropriés qui décrivent ces fonctions clé, résumés ici en 15 traits fonctionnels, dont 5 pour l'acquisition de la nourriture et 10 pour la locomotion ; (iv) construire une matrice de traits-espèces et appliquer des méthodes d'analyse multivariées appropriées pour produire des groupes fonctionnels.

2-3-6. Indice de redondance fonctionnelle

La redondance est une dimension importante de la diversité fonctionnelle, car elle correspond au nombre d'espèces présentes dans le milieu et qui exercent les mêmes fonctions. Plus l'indice de redondance fonctionnelle (IRF) sera élevé et plus la résistance des espèces à une perturbation devrait être *a priori* importante [23, 24]. Il a été calculé selon **l'Equation** :

$$IRF = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{S_f}} \tag{1}$$

P_i = la proportion des espèces du groupe fonctionnel (i) par rapport à l'abondance totale ; *P_i* est défini par le rapport *N_i* / *N_t*, où *N_i* et *N_t* représente respectivement l'abondance du groupe fonctionnel et celle du peuplement en entier ; *S_f* = représente la richesse du groupe fonctionnel (i) ; *n* = le nombre total de groupes fonctionnels.

2-3-7. Indice de charge de pollution

Cet indice permet de mettre en exergue l'impact des activités anthropiques sur la qualité des sédiments. L'Indice de charge de pollution introduit par [25] est déterminé par la **Relation** suivante.

$$IP = (CF1 \times CF2 \times CF3 \dots \dots \times CFn)/n \tag{2}$$

n = nombre de métaux (5 dans la présente étude) et *CF* = facteur de contamination. Le facteur de contamination est calculé par la formule suivante : *CF* = concentration du métal dans les sédiments/valeurs Background du métal, Valeurs Background du métal = Concentration des métaux lourds dans la croûte continentale [26]

2-4. Analyses statistiques

2-4-1. Analyse de classification hiérarchique sur les axes de l'analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée séparément pour chaque fonction (acquisition de la nourriture et locomotion) clé à l'aide de la matrice standardisée afin d'identifier les traits fonctionnels qui représentent le plus de variation. Ensuite, une Analyse de Classification Hiérarchique (ACH) a été effectuée par la méthode des K-means pour chacune des fonctions clé en utilisant les valeurs moyennes des deux premiers axes de l'ACP [10]. Les résultats du regroupement de la locomotion et de l'acquisition de nourriture ont été utilisés pour délimiter les groupes fonctionnels. Les espèces qui se regroupent à la fois pour les deux fonctions clé forment un groupe fonctionnel multispécifique (plus deux espèces dans le groupe fonctionnel). Dans le cas contraire, le groupe fonctionnel est dit monospécifique (une seule espèce dans le groupe fonctionnel) [7]. Cette analyse a été réalisée à partir du logiciel R 3.5.1 à l'aide du package « ad4 et Factominer. ».

2-4-2. Corrélation et régression linéaires

La corrélation et la régression linéaire ont permis de mettre en relation les groupes fonctionnels et l'indice de charge de pollution. Pour cette analyse, le logiciel R 3.5.1 (package « ggplot ») a été utilisé.

2-4-3. Test de kruskal wallis

Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé, pour comparer les séries de valeurs de l'indice de redondance fonctionnelle des différentes zones minières. Cette analyse a été réalisée à partir du logiciel R 3.5.1 à l'aide du package « ad4 ».

3. Résultats

3-1. Composition et classification des espèces en groupes fonctionnels (GF) dans les trois zones minières

Les résultats des Analyses de Classification Hiérarchique sur les deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales pour les fonctions de l'acquisition de la nourriture et de la locomotion sont synthétisés dans les **Tableaux 1, 2 et 3**.

3-1-1. Zone diamantifère (TORTIYA)

Le **Tableau 1** présente la synthèse des groupes fonctionnels à partir des traits fonctionnels (acquisition de la nourriture et locomotion) des espèces enregistrées dans la zone de TORTIYA. Quatorze (14) groupes fonctionnels sont définis dont 9 groupes fonctionnels multispécifiques (III, V, VI, VII, VIII, IX, XI et XII, XIV) et 5 groupes fonctionnels monospécifiques (I, II, IV, X et XIII). Les groupes fonctionnels VII (*Brycinus imberi*, *Brycinus macrolepidotus*, *Brycinus longipinnis*, *Pellonula leonensis* et *Schilbe mandibularis*) et IX (*Labeo coubie*, *Sarotherodon galilaeus*, *Oreochromis niloticus*, *Coptodon zillii* et *Coptodon hybride*) présentent le plus grand nombre d'espèces avec 5 espèces chacun. Ces groupes sont suivis des groupes fonctionnels III (*Pollimyrus isidori*, *Petrocephalus bovei*, *Schilbe intermedius* et *Heterobranchus longifilis*), VI (*Enteromius abables*, *Enteromius macrops*, *Brycinus nurse* et *Hepsetus odoe*), XII (*Hemichromis bimaculatus*, *Mormyrus rume*, *Marcusenius ussheri* et *Chrysichthys nigrodigitatus*) et XIV (*Synodontis schall*, *Synodontis punctifer*, *Auchenoglanis occidentalis*, et *Chrysichthys maurus*) avec respectivement 4 espèces. Deux (2) espèces

composent les groupes fonctionnels V (*Parachanna obscura* et *Heterotis niloticus*), VIII (*Ctenopoma petherici* et *Ctenopoma kingsleyae*) et XI (*Hemichromis fasciatus* et *Chromidotilapia guntheri*). Les groupes fonctionnels I (*Polypterus endlicheri*), II (*Clarias anguillaris*), III (*Synodontis bastianii*), X (*Labeo parvus*) et XIII (*Labeo senegalensis*) sont représentés par une seule espèce.

3-1-2. Zone aurifère (HIRE)

La synthèse des groupes fonctionnels à partir des traits fonctionnels (acquisition de la nourriture et locomotion) des espèces enregistrées dans la zone de HIRE sont présentés par le **Tableau 2**. Dix (10) groupes fonctionnels sont définis dont 6 groupes fonctionnels multispécifiques (II, IV, V, VII, VIII et X) et 4 groupes fonctionnels monospécifiques (I, III, VI et IX). Les groupes fonctionnels IV, VIII et VII regroupent plus les espèces, avec respectivement 6 (*Enteromius hypsolepis*, *Brycinus longipinnis*, *Enteromius abables*, *Schilbe intermedius*, *Schilbe mandibularis* et *Hepsetus odoe*) 5 (*Hemichromis bimaculatus*, *Hemichromis fasciatus*, *Oreochromis niloticus*, *Coptodon zillii* et *Chromidotilapia guntheri*) et 4 (*Petrocephalus bovei*, *Pollimyrus isidori*, *Brienomyrus brachyistius* et *Brienomyrus brachyistius*). Le groupe fonctionnel V est composé de 3 espèces (*Parachanna obscura*, *Ctenopoma petherici* et *Ctenopoma kingsleyae*). Quant aux groupes fonctionnels II (*Clarias gariepinus* et *Clarias anguillaris*) et X (*Auchenoglanis occidentalis* et *Chrysichthys nigrodigitatus*), ils sont représentés par 3 espèces chacun. Concernant les groupes fonctionnels I (*Synodontis schallii*), III (*Enteromius macrops*), VI (*Heterobranchus isopterus*) et IX (*Coptodon* hybride), ils sont constitués chacun par une espèce.

3-1-3. Zone manganifère (LAUZOUA)

Le **Tableau 3** présente la synthèse des groupes fonctionnels à partir des traits fonctionnels (acquisition de la nourriture et locomotion) des espèces enregistrées dans la zone de LAUZOUA. Onze (11) groupes fonctionnels dont 7 groupes fonctionnels multisécifiques (II, IV, VI, VII, VIII, X et XI) et 4 groupes fonctionnels monospécifiques (I, III, V et IX) sont définis. Le groupe fonctionnel II rassemble le plus grand nombre d'espèces avec 5 espèces (*Schilbe intermedius*, *Schilbe mandibularis*, *Brycinus longipinnis*, *Hepsetus odoe* et *Enteromius abables*). Les groupes fonctionnels VIII (*Marcusenius senegalensis*, *Marcusenius ussheri*, *Mormyrus rume* et *Petrocephalus bovei*) et XI (*Coptodon guineensis*, *Chromidotilapia guntheri*, *Thysochromis ansorgii* et *Coptodon hybride*) regroupent 4 espèces chacune. Quant aux groupes fonctionnels IV (*Clarias gariepinus*, *Clarias anguillaris* et *Parachanna obscura*) et VII (*Chrysichthys nigrodigitatus*, *Chrysichthys maurus* et *Synodontis schallii*), ils sont constitués chacun de 3 espèces. En ce qui concerne, les groupes fonctionnels VI (*Ctenopoma petherici* et *Ctenopoma kingsleyae*) et X (*Labeo coubie* et *Distichodus rostratus*), ils sont composés de 2 espèces chacune. Les espèces *Heterobranchus isopterus*, *Papyrocranus afer*, *Polypterus endlicheri* et *Clarias buettikoferi* composent respectivement les groupes I, III, V et IX.

Tableau 1 : Synthèse des groupes fonctionnels à partir des traits fonctionnels (acquisition de la nourriture et locomotion) des espèces enregistrées dans la zone diamantifère

Espèces	FONCTIONS		
	Acquisition de la Nourriture	Locomotion	Groupes fonctionnels
<i>Polypterus endlicheri</i> (Heckel, 1847)	A	G	I
<i>Clarias anguillaris</i> (Linnaeus, 1758)	A	F	II
<i>Pollimyrus isidori</i> (Valenciennes, 1847)			
<i>Schilbe intermedius</i> (Rüppell, 1832)	B	I	III
<i>Petrocephalus bovei</i> (Valenciennes, 1847)			
<i>Heterobranchus longifilis</i> (Valenciennes, 1840)			
<i>Synodontis bastiani</i> (Daget, 1948)	B	G	IV
<i>Heterotis niloticus</i> (Cuvier, 1829)	B	F	V
<i>Parachanna obscura</i> (Günther, 1861)			
<i>Enteromius abables</i> (Bleeker, 1863)			
<i>Enteromius macrops</i> (Boulenger, 1911)			
<i>Hepsetus odoe</i> (Bloch, 1794)	C	I	VI
<i>Brycinus nurse</i> (Rüppell, 1832)			
<i>Brycinus longipinnis</i> (Günther, 1864)			
<i>Brycinus imberi</i> (Peters, 1852)			
<i>Brycinus macrolepidetus</i> (Valenciennes, 1850)	C	H	VII
<i>Pellonula leonensis</i> (Boulenger, 1916)			
<i>Schilbe mandibularis</i> (Günther, 1867)			
<i>Ctenopoma kingsleyae</i> (Günther, 1896)	C	F	VIII
<i>Ctenopoma petherici</i> (Günther, 1864)			
<i>Coptodon hybride</i> (Bleeker 1862)			
<i>Coptodon zillii</i> (Gervais, 1848)			
<i>Sarotherodon galilaeus</i> (Linnaeus, 1758)	D	I	IX
<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus, 1758)			
<i>Labeo coubie</i> (Rüppell, 1832)			
<i>Labeo parvus</i> (Boulenger, 1902)	D	H	X
<i>Chromidotilapia guntheri</i> (Sauvage, 1882)	E	F	XI
<i>Hemichromis fasciatus</i> (Peters, 1857)			
<i>Hemichromis bimaculatus</i> (Gill, 1862)			
<i>Marcusenius ussheri</i> (Günther, 1867)	E	I	XII
<i>Mormyrus rume</i> (Gill, 1862)			
<i>Chrysichtys nigrodigitatus</i> (Lacépède, 1803)			
<i>Labeo senegalensis</i> (Valenciennes, 1842)	E	H	XIII
<i>Synodontis punctifer</i> (Daget, 1965)			
<i>Synodontis schall</i> (Bloch Schneider, 1801)	E	G	XIV
<i>Auchenoglanis occidentalis</i> (Valenciennes, 1842)			
<i>Chrysichtys maurus</i> (Valenciennes, 1840)			

Lettre A-I : résultat de l'analyse classification hiérarchique

Tableau 2 : Synthèse des groupes fonctionnels à partir des traits fonctionnels (acquisition de la nourriture et locomotion) des espèces enregistrées dans la zone aurifère

Espèces	FONCTIONS		
	Acquisition de la Nourriture	Locomotion	Groupes Fonctionnels
<i>Synodontis schall</i> (Bloch Schneider, 1801)	A	G	I
<i>Clarias anguillaris</i> (Linnaeus, 1758)	A	E	II
<i>Clarias gariepinus</i> (Burchell, 1822)			
<i>Enteromius macrops</i> (Boulenger, 1911)	B	F	III
<i>Enteromius hypsolepis</i> (Daget, 1959)			
<i>Brycinus longipinnis</i> (Günther, 1864)			
<i>Enteromius abables</i> (Bleeker, 1863)	B	H	IV
<i>Schilbe intermedius</i> (Rüppell, 1832)			
<i>Schilbe mandibularis</i> (Günther, 1867)			
<i>Hepsetus odoe</i> (Bloch, 1794)			
<i>Ctenopoma kingsleyae</i> (Günther, 1896)			
<i>Ctenopoma petherici</i> (Günther, 1864)	B	E	V
<i>Parachanna obscura</i> (Günther, 1861)			
<i>Heterobranchus isopterus</i> (Bleeker, 1863)	C	E	VI
<i>Brienomyrus brachyistius</i> (Gill, 1862)			
<i>Petrocephalus bovei</i> (Valenciennes, 1847)	D	H	VII
<i>Pollimyrus isidori</i> (Valenciennes, 1847)			
<i>Enteromius tripsilos</i> (Bleeker, 1863)			
<i>Hemichromis bimaculatus</i> (Gill, 1862)			
<i>Hemichromis fasciatus</i> (Peters, 1857)			
<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus, 1758)	D	E	VIII
<i>Coptodon zillii</i> (Gervais, 1848)			
<i>Chromidotilapia guntheri</i> (Sauvage, 1882)			
<i>Coptodon hybride</i> (Bleeker 1862)	D	F	IX
<i>Auchenoglanis occidentalis</i> (Valenciennes, 1842)	D	G	X
<i>Chrysichtys nigrodigitatus</i> (Lacépède, 1803)			

Lettre A-H : résultat de l'analyse classification hiérarchique

Tableau 3 : Synthèse des groupes fonctionnels à partir des traits fonctionnels (acquisition de la nourriture et locomotion) des espèces enregistrées dans la zone manganifère

Espèces	FONCTIONS		
	Acquisition de la Nourriture	Locomotion	Groupes Fonctionnels
<i>Heterobranchus isopterus</i> (Bleeker, 1863)	A	I	I
<i>Enteromius abables</i> (Bleeker, 1863)			
<i>Brycinus longipinnis</i> (Günther, 1864)	B	F	II
<i>Hepsetus odoe</i> (Bloch, 1794)			
<i>Schilbe intermedius</i> (Rüppell, 1832)			
<i>Schilbe mandibularis</i> (Günther, 1867)			
<i>Papyrocranus afer</i> (Günther, 1868)	B	H	III
<i>Clarias gariepinus</i> (Burchell, 1822)			
<i>Parachanna obscura</i> (Günther, 1861)	B	I	IV
<i>Clarias anguillaris</i> (Linnaeus, 1758)			
<i>Polypterus endlicheri</i> (Heckel, 1847)	B	E	V
<i>Ctenopoma petherici</i> (Günther, 1864)			
<i>Ctenopoma kingsleyae</i> (Günther, 1896)	B	G	VI
<i>Chrysichthys maurus</i> (Valenciennes, 1840)			
<i>Chrysichthys nigrodigitatus</i> (Lacépède, 1803)	C	E	VII
<i>Synodontis schall</i> (Bloch Schneider, 1801)			
<i>Marcusenius senegalensis</i> (Steindachner, 1894)			
<i>Marcusenius ussheri</i> (Günther, 1867)			
<i>Mormyrus rume</i> (Gill, 1862)	C	G	VIII
<i>Petrocephalus bovei</i> (Valenciennes, 1847)			
<i>Clarias buettikoferi</i> (Steindachner, 1894)	C	I	IX
<i>Labeo coubie</i> (Rüppell, 1832)	D	F	X
<i>Distichodus rostratus</i> (Günther, 1864)			
<i>Coptodon guineensis</i> (Günther, 1862)			
<i>Coptodon hybride</i> (Bleeker 1862)	D	I	XI
<i>Chromidotilapia guntheri</i> (Sauvage, 1882)			
<i>Thysochromis ansorgii</i> (Boulenger, 1901)			

Lettre A-I : résultat de l'analyse classification hiérarchique

3-2. Variation spatiale de l'indice de redondance fonctionnelle global (IRF)

La variation spatiale de l'indice de redondance fonctionnelle est présentée par la **Figure 2**. Les valeurs médianes de l'indice oscillent entre 1,92 dans la zone manganifère et 3,22 dans la zone aurifère. L'application du test de Kruskal-Wallis pour $p < 0,05$ montre une différence significative entre la zone aurifère et celles des zones manganifère et diamantifère.

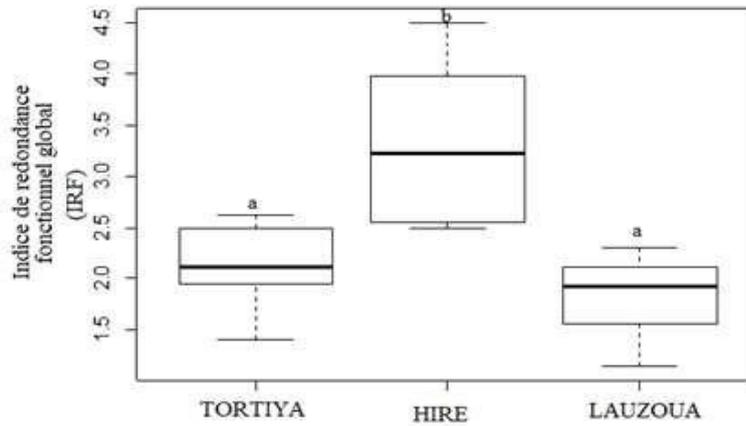


Figure 2 : Variation spatiale de l'indice de redondance fonctionnelle globale du peuplement ichtyologique dans les trois zones minières

3-3. Relation entre les groupes fonctionnels et l'indice de charge de pollution des trois zones minières

Le **Tableau 4** présente les espèces pour lesquelles la corrélation entre les abondances des individus des groupes fonctionnels et l'indice de pollution est significative dans les trois (3) zones minières. En ce qui concerne la zone diamantifère, les individus du groupe fonctionnel XIV (*Synodontis schall*, *Synodontis punctifer*, *Auchenoglanis occidentalis* et *Chrysichthys maurus*) augmentent significativement ($r = 0,93$; $p < 0,05$) avec l'indice de pollution. Pour ce qui est de la zone aurifère les individus du groupe fonctionnel VIII (*Hemichromis bimaculatus*, *Hemichromis fasciatus*, *Oreochromis niloticus*, *Coptodon zillii* et *Chromidotilapia guntheri*) augmente significativement ($r = 0,89$; $p < 0,05$) avec l'indice de pollution. Dans la zone manganifère ce sont individus du groupe fonctionnel VII composé des espèces *Chrysichthys maurus*, *Chrysichthys nigrodigitatus*, et *Synodontis schall* qui augmentent significativement ($r = 0,7$; $p < 0,05$) avec l'indice de pollution.

Tableau 4 : Récapitulatif des corrélations des abondances des individus des groupes fonctionnels associés à l'indice de pollution dans les trois zones minières

ZONES MINIERES	GROUPE FONCTIONNELS	r	p	Réponse à la pollution
Diamantifère	Groupe XIV	0,93	*	↑
Aurifère	Groupe VIII	0,89	*	↑
Manganifère	Groupe VII	0,7	*	↑

$r =$ coefficient de corrélation ; $p =$ probabilité ; * = variation significative ($p < 0,05$) = ↑ augmente avec la pollution.

4. Discussion

4-1. Composition et classification des espèces en groupes fonctionnels (GF) dans les trois zones minières

La classification des espèces en groupes fonctionnels est un outil utile pour identifier la redondance et l'unicité dans une communauté [7]. Considérant les deux fonctions clé (acquisition de la nourriture et la locomotion) étudiées dans notre travail, 10, 11 et 14 groupes fonctionnels ont été déterminés respectivement dans les zones aurifère, manganifère et diamantifère. Le nombre de groupes fonctionnels relativement élevé

dans la zone diamantifère serait dû probablement à la forte richesse spécifique. Rappelons en effet, que 37 espèces ont été manipulées dans cette zone contre 26 et 28 respectivement dans les zones aurifère et manganifère [16]. De nombreux auteurs affirment que la richesse fonctionnelle (nombre des groupes fonctionnels) est liée positivement à la richesse spécifique [27]. Ceci traduit que le nombre des groupes fonctionnels augmente avec la richesse spécifique. Un nombre relativement élevé des espèces dans les groupes fonctionnels VII et IX dans la zone diamantifère a été observé. Au niveau de la zone aurifère, ce sont les groupes fonctionnels IV, VIII et VII. Dans la zone manganifère, on a les groupes fonctionnels II, VIII et XI. Ce nombre observé peut conduire à une plus grande stabilité dans le temps de ces groupes [28]. Plus le nombre d'espèces ayant des fonctions similaires dans un peuplement est grand, plus la probabilité qu'au moins une des espèces survivra aux différentes pressions anthropiques et maintiendra les propriétés de l'écosystème [8, 29]. Concernant les groupes fonctionnels monospécifiques, 4 (I, III, VI et IX), 4 (I, III, V et IX) et 5 (I, II, IV, X et XIII) ont été obtenus respectivement dans la zone aurifère, manganifère et diamantifère. Ceci implique que chaque espèce contribue au fonctionnement de l'écosystème d'une manière unique. Par conséquent, la perte de ces espèces entraînerait un changement notable dans le fonctionnement et la stabilité de l'écosystème [12]. De plus, ces groupes fonctionnels monospécifiques sont plus vulnérables [13]. Car les fonctions assurées par les espèces de ces groupes sont plus susceptibles de disparaître sous certaines pressions anthropiques sans aucune chance d'être compensées par d'autres. Ainsi, ces espèces sont essentielles pour maintenir certains aspects du fonctionnement de l'écosystème.

4-2. Indice de redondance fonctionnelle global (IRF)

Concernant l'indice de redondance fonctionnelle global, des valeurs significativement élevées dans la zone aurifère et faible dans les zones diamantifères et manganifères ont été enregistrées. Ces fortes valeurs, obtenues dans la zone aurifère, suggèrent que la plupart des espèces présentent des fonctions similaires dans la communauté et l'écosystème (les niches fonctionnelles similaires). Ceci peut prévenir la perte du fonctionnement de l'écosystème suite à un déclin de la diversité des espèces, conférant ainsi une stabilité (c'est-à-dire une résistance et une résilience) de l'écosystème [30]. La faible redondance fonctionnelle implique que l'écosystème est sensible aux changements des pressions externes telles que l'hydrographie, les apports de nutriments et de métaux lourds, et la surexploitation des pêcheries qui peuvent entraîner des réductions drastiques de l'abondance des poissons [28, 31]. Ce qui est un scénario plausible, en particulier dans les zones diamantifères et manganifères. Ceci entraînera un déséquilibre de l'écosystème dans ces zones.

4-3. Relation entre les groupes fonctionnels et l'indice de pollution des trois zones minières

Nos résultats relèvent que l'abondance des espèces des groupes fonctionnels XIV, VIII et VII respectivement dans la zone diamantifère, aurifère et manganifère augmente significativement avec la contamination des sédiments par les métaux lourds. Les espèces de ces groupes fonctionnels se nourrissent dans leur ensemble dans la vase [32]. Il a été démontré que dans la plupart des systèmes aquatiques, les sédiments contiennent significativement plus de métaux lourds que la colonne d'eau [33]. En effet, les métaux lourds nuisent à la vie aquatique en réduisant la richesse et l'abondance des espèces de poissons [34]. L'action toxique des métaux est particulièrement prononcée dans les premiers stades du développement du poisson [35] et affecte de manière défavorable divers processus métaboliques du poisson en développement (les embryons en particulier). Ce qui entraîne un retard de développement, des difformités morphologiques et fonctionnelles ou la mort des individus les plus sensibles [36]. Dans ce scénario, les espèces de ces différents groupes fonctionnels observées pourraient être considérées comme polluorésistantes aux métaux lourds. Cela sous-entend que ces espèces peuvent être qualifiées de bioindicatrices pour le suivi des impacts liés aux activités minières et autres activités anthropiques dans les trois zones respectives.

5. Conclusion

La présente étude a permis d'identifier les espèces méritant une protection ou un intérêt particulier. Dans la zone diamantifère, ce sont : *Polypterus endlicheri*, *Clarias anguillaris*, *Synodontis bastiani*, *Labeo parvus* et *Labeo senegalensis*. Pour la zone aurifère, ce sont : *Synodontis schall*, *Enteromius macrops*, *Heterobranchus isopterus* et *Coptodon* hybride. Au niveau de la zone manganifère, ce sont : *Heterobranchus isopterus*, *Papycrocranus afer*, *Polypterus endlicheri* et *Clarias buettikoferi*. Les espèces de la zone aurifère ont une capacité plus grande de résistance aux perturbations. Quant à celles des diamantifère et manganifère, elles sont plus vulnérables aux perturbations. La relation entre les groupes fonctionnels et l'indice de pollution a permis de mettre en exergue 3 (*Chrysichthys maurus*, *Chrysichthys nigrodigitatus*, *Synodontis schall*), 4 (*Synodontis schall*, *Synodontis punctifer*, *Auchenoglanis occidentalis* et *Chrysichthys maurus*) et 5 (*Hemichromis bimaculatus*, *Hemichromis faciatus*, *Oreochromis niloticus*, *Coptodon zillii* et *Chromidotilapia guntheri*) espèces considérées comme des polluo-résistantes aux métaux lourds respectivement dans la zone manganifère (LAUZOUA), diamantifère (TORTIYA) et aurifère (HIRE).

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements à UNESCO-SIDA (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization / SIDA) pour le financement de cette étude. Au Professeur EDIA Di Edia et aux Docteurs KONAN Koffi Mexmin et NIAMIEN Julie Estelle épouse EBROTTIE, Promoteurs du projet « Mapping and Assessing the Environmental and Health Impacts of Abandoned Mines in Sub-Saharan African Countries », nous tenons à exprimer notre gratitude pour notre admission sur ce projet d'étude.

Références

- [1] - G. BRIGDE, Contested terrain : Mining and the environment. *Annual Review of the Environment and Resources*, 29 (2004) 205 - 209
- [2] - C. SCOTT, Aboriginal Autonomy and Development in Northern Quebec and Labrador. University of British Columbia. Press : Vancouver and Toronto, (2002)
- [3] - S. LOKO, K. E. AHOSSI, Y. B. KOFFI, N. F. KAKOU, A. M. KOUASSI and J. BIEMI, Microbiological and physico-chemical quality of groundwater from artisanal sites of mining exploitation in the South-West of Côte d'Ivoire : case of the area of Hiré. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 9 (2013) 567 - 574
- [4] - H. YAPI, B. DONGUI, A. TROKOUREY, Y. BARIMA, Y. ESSIS and P. ATHEBA, Evaluation de la pollution métallique des eaux souterraines et de surface dans un environnement minier aurifère à Hiré (Côte d'Ivoire). *International journal of biological and chemical sciences*, 8 (2014) 1281 - 1289
- [5] - K. Y. NANGAH, K. T. P. ANGUI, Y. K. N. KOUAKOU, G. F. YAO, K. A. ALUI, K. A. N'GUESSAN, A. YAO-KOUAMÉ and I. SAVANE, Assessment of morphological and geological environment of manganese containing area in South West of Côte d'Ivoire. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 1 (2013) 23 -32
- [6] - K. K. M. YOBOUE, La question de la remédiation environnementale résultant de l'exploitation artisanale, à petite échelle du diamant : cas de l'Union du Fleuve Mano. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier (SDU2E), (2017) 272 p.
- [7] - F. CORDOVA-TAPIA and L. ZAMBRANO, Fish functional groups in a tropical wetland of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Neotropical Ichthyology*, 14 (2016) 150 - 162

- [8] - S. DÍAZ and M. CABIDO, Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16 (2001) 646 - 655
- [9] - S. NAEEM and J. P. WRIGHT, Disentangling biodiversity effects on ecosystem functioning : deriving solutions to a seemingly insurmountable problem. *Ecology Letters*, 6 (2003) 567 - 579
- [10] - O. DUMAY, P. S. TARI, J. A. TOMASINI and D. MOUILLOT, Functional groups of lagoon fish species in Languedoc Roussillon, southern France. *Journal of Fish Biology*, 64 (2004) 970 - 983
- [11] - J. BLONDEL, Guilds or functional groups : does it matter? *Oikos*, 100 (2003) 223 - 231
- [12] - M. S. PRATCHETT, A. S. HOEY, K. V. WILSON, S. MESSEMER and N. A. J. GRAHAM, Changes in biodiversity and functioning of reef fish assemblages following coral bleaching and coral loss. *Diversity*, 3 (2011) 424 - 452
- [13] - M. SCHERER-LORENZEN, Biodiversity and ecosystem functioning: basic principles. In: Barthlott, W., E. Linsenmair & S. Porembski (Eds.). *Biodiversity : Structure and Function*. Oxford, EOLSS Publishers, (2005)
- [14] - K. K. M. YOBOUE, J. DARROZES, B. ELYAKIME and E. MAIRE, Tortiya, quand le diamant fait perdre la tête. Rapport du GRPIE (Groupe de Recherche et de Plaidoyer sur les Industries Extractives) et du PAC (Partenariat Afrique Canada). *Ottawa*, (2015) 23 p.
- [15] - K. Y. NANGAH, A. YAO-KOUAME, G. F. YAO, Y. K. N. KOUAKOU, K. A. ALUI and I. SAVANE, Attributs physico-chimiques et contrainte à la productivité agricole des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry) en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 50 (2012) 3459 - 3467
- [16] - A. P. ANI, K. M. KONAN, O. E. EDIA, J. E. NIAMIEN-EBROTTIÉ and M. OUATTARA, Comparative analysis of fish assemblages in three mining areas (Diamond, Gold and Manganese) of Ivory Coast (West Africa). *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 8 (2020) 176 - 185
- [17] - G. OCHIENG, E. SEANEGO and O. NKWONTA, Impacts of mining on water resources in South Africa: a review. *Scientific Research and Essays-Academic*, 5 (2010) 3351 - 3357
- [18] - D. PAUGY, C. LEVEQUE and G. G. TEUGELS, Poissons d'eaux douces et saumâtres de l'Afrique de l'Ouest, édition complète. Tome I & II. Edition IRDMNH- MRAC, Paris- Turvuren, (2003) 457 + 815 p.
- [19] - D. MOUILLOT, O. DUMAY and J. A. TOMASINI, Limiting similarity, niche filtering and functional diversity in brackish lagoon fish communities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71 (2007) 443 - 456
- [20] - S. MERIGOUX and D. PONTON, Body shape, diet and ontogenetic diet shifts in young fish of the Sinnamary River, French Guiana, South America. *Journal of fish biology*, 52 (1998) 556 - 569
- [21] - S. VILLÉGER, J. R. MIRANDA, D. F. HERNÁNDEZ and D. MOUILLOT, Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation. *Ecological Applications*, 20 (2010) 1512 - 1522
- [22] - C. R. FONSECA and G. GANADE, Species functional redundancy, random extinctions and the stability of ecosystems. *Journal of Ecology*, 89 (2001) 118 - 125
- [23] - G. PETERSON, C. R. ALLEN and C. S. HOLLING, Ecological resilience, biodiversity, and scale. *Ecosystems*, 1 (1998) 6 - 18
- [24] - K. S. MCCANN, The diversity-stability debate. *Nature*, 405 (2000) 228 - 233
- [25] - D. C. TOMILSON, D. J. WILSON, C. R. HARRIS and D. W. JEFFREY, Problem in assessment of heavy metals in estuaries and the formation of pollution index. *Helgolander Meeresuntersuchungen*, 33 (1980) 566 - 575
- [26] - K. H. WEDEPOHL, The composition of continental crust. *Goechimica and Cosmochimica Acta*, 59 (1995) 1217 - 1232
- [27] - D. SCHLEUTER, M. DAUFRESNE, F. MASSOL and C. ARGILLIER, A user's guide to functional diversity indices. *Ecological Monographs*, 80 (2010) 469 - 484
- [28] - J. RICE, N. DAAN, H. GISLASON and J. POPE, Does functional redundancy stabilize fish communities ? *ICES Journal of Marine Science*, 70 (2013) 734 - 742

- [29] - D. U. HOOPER, F. S. CHAPIN, J. J. EWEL, A. HECTOR, P. INCHAUSTI, S. LAVOREL, J. H. LAWTON, D. M. LODGE, M. LOREAU, S. NAEEM, B. SCHMID, H. SETALA, A. J. SYMSTAD, J. VANDERMEER and D. A. WARDLE, Effects of biodiversity on ecosystem functioning : A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75 (2005) 3 - 35
- [30] - D. MOUILLOT, S. VILLÉGER, V. PARRAVICINI, M. KULBICKI, J. E. ARIAS-GONZÁLEZ, M. BENDER, P. CHABANET, S. R. FLOETER, A. FRIEDLANDER, L. VIGLIOLA and D. R. BELLWOOD, Functional over-redundancy and high functional vulnerability in global fish faunas on tropical reefs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (2014) 13757 - 13762
- [31] - F. MICHELI and B. S. HALPERN, Low functional redundancy in coastal marine assemblages. *Ecology Letters*, 8 (2005) 391 - 400
- [32] - B. R. D. ABOUA, K. G. N'ZI, E. P. KOUAMELAN, S. BERTE and M. BAMBA, Organisation spatiale du peuplement de poissons dans le Bandama. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4 (2010) 1480 - 1493
- [33] - A. J. HOROWITZ and K. A. ELRICK, The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Applied Geochemistry*, 2 (1987) 437 - 451
- [34] - US EPA, The effects of mountaintop mines and valley fills on aquatic ecosystems of the central Appalachian coalfields. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington DC EPA/600/R-09/138F
- [35] - R. VINODHINI and M. NARAYANAN, Bioaccumulation of heavy in organs of fresh water fish *Cyprinus carpio* (Common carp). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5 (2008) 179 -182
- [36] - D. G. SFAKIANAKIS, E. RENIERI, M. KENTOURI and A. M. TSATSAKIS, Effect of heavy metals on fish larvae deformities : A review. *Environmental Research*, 137 (2015) 246 - 255