

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie Physico-Chimique
Spécialité Biochimie Appliquée



Réf :

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Analyse des effets des métaux lourds sur les
paramètres physiologiques des poissons :
Approches statistiques et traitement des
données scientifiques.**

Présenté par :

Mlle. Zaidi Agnès

Soutenu le : 30/06/2024

Devant le jury composé de :

M. Djebbar ATMANI

Mme. Hafsa DJOUDADEPSE KADJI

M. Salim OUCHEMOUKH

Professeur

Professeur

Professeur

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2023 / 2024

Remercîments

Je tiens à remercier en premier lieu ma directrice de recherche Madame Hafsa Djoudad EPSE Kadji, qui s'est montrée disponible pour me guider avec des conseils et des commentaires vigoureux.

Je remercie vivement les membres du jury qui ont eu l'amabilité de porter une appréciation sur ce travail et de participer autant que jury de soutenance.

Un hommage éternel à l'ensemble des enseignants qui m'ont encadré depuis mes premières années d'études jusqu'à aujourd'hui.

Merci également à tous mes collègues et mes amis qui ont toujours su me soutenir et m'encourager à la réalisation de ce travail que ça soit de près ou de loin.

Dédicaces

C'est avec une profonde gratitude et des mots sincères que je dédie à mes parents « Tassadit » et « Yacine », le fruit de toutes ses années d'études et sans qui je n'aurais pu mener à bien ce travail grâce à leur conseils et encouragements et qui m'ont permis de devenir la personne que je suis aujourd'hui et qui représente une petite partie de toute la gratitude que je leur porte.

Je dédie aussi ce travail à mes sœurs « Mélissa » et « Elsa » qui y ont contribué via leurs soutien et aide et cela même à plusieurs kilomètres de moi.

J'adresse aussi mes reconnaissances à mes amis Ghozlane, Nazim, Adel, Rayanne, Lydia, Nadia, Youcef, Melyna qui m'ont toujours encouragé et qui m'ont motivé à exécuter.

Tables de matières	
Remercîments	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique	3
1-Généralités sur les poissons	3
1.1-Définiio des poissons	3
1.2-La classification des poissons	4
1.3- La morphologie des poissons	5
1.3.1- La morphologie externe	5
1.3.2-L'anatomie interne	7
1.4- L'importance des poissons dans l'écosystème	8
2- Mécanismes physiologiques des poissons	9
2.1-Mécanisme hématologiques	9
2.2-Mécanisme biochimique	10
2.3-Mécanisme immunologique	11
2.4-Mécanisme enzymatique	12
3-Impact des métaux lourds sur les poissons	14
Chapitre II ; Approches méthodologiques	15
1.Approche 1 : Collecte des articles scientifiques	15
1.1-Recherche en ligne	15
1.2-Classement des articles	15
2.Approche 2 : Collecte des conditions méthodologiques	16
2.1-Fiche technique	16
2.2-Tableaux Excel	17
3.Approche 3 : Collecte des résultats expérimentaux	17
3.1-Fiche technique des paramètres hématologiques	18
3.2-Fiche technique des paramètres biochimique	18
3.3-Fiche technique des paramètres immunologiques	19

3.4-Fiche techniques des paramètres enzymologiques	19
3.5-Tableaux Excel	19
4.Traitement statistique	20
Chapitre III : Résultats statistiques et argumentations scientifiques	21
1.Résultats statistiques des conditions méthodologiques	21
1.1-Les paramètres hématologiques	21
1.1.1-Lecture des résultats	22
1.1.2-Argumentation scientifiques	22
1.2-Les paramètres biochimiques	23
1.2.1-Lecture des résultats	23
1.2.2-Argumentations scientifiques	25
1.3-Les paramètres immunologiques	26
1.3.1-Lecture des résultats	27
1.3.2-Argumentation scientifiques	27
1.4-Les paramètres enzymologiques	28
1.4.1-Lecture des résultats	28
1.4.2-Argumentation scientifiques	30
2.Résultas statistiques des données expérimentales	31
2.1-Les paramètres hématologiques	31
2.1.1-Les globules rouges	32
2.1.2- Les globules blancs	33
2.1.3-Hémoglobine	34
2.1.4-Hématocrite	35
2.2-Les paramètres biochimiques	36
2.2.1-Les protéines totales	36
2.2.2-Les lipides totaux	38
2.2.3-Le glucose	38
2.3-Les paramètres immunologiques	39
2.3.1-L'activité lysozymique	40
2.3.1-Les immunoglobulines	41
2.3.2-Le complément C3	42
2.4-Les paramètres enzymologiques	43

2.4.1-Activité catalytiques	44
2.4.2-La superoxyde dismutase	44
2.4.3-Alanine aminotransférase	45
Chapitre IV : Conclusions et perspectives	48

Liste des figures

N°	Titres	Pages
1	Schéma explicatif des différents milieux qui abritent les poissons (figure originale)	3
2	Aspects des poissons : (A) <i>Carnegiella strigata</i> . (B) <i>Pelvicachromis pulcher</i>	4
3	Schéma explicatif des différents groupes de poissons (figure originale)	4
4	Schéma explicatif des Gnathostomes (figure originale)	5
5	Les caractéristiques externes générales d'un poisson.	6
6	La ligne latérale de poisson	7
7	Le système circulatoire et circulation sanguine chez le poisson	9
8	Schéma explicatif de la circulation sanguine chez les poissons	9
9	Différents métabolismes et processus des protéines, lipides et glucose	10
10	Schématisation des trois lignes de défense présentes chez les poissons Téléostéens	11
11	Evolution d'une enzyme pancréatique, la trypsine, et d'une enzyme intestinale, la leucine aminopeptidase (lap), au cours du développement de la larve de bar (dosées sur des larves entières broyées et homogénéisées)	13
12	Recherche en ligne via Google Scholar (Photo originale).	15
13	Classement des articles dans différents dossiers (Photo originale).	16
14	Synthèse des conditions méthodologiques sur des fiches cartonnées (Photo originale).	17
15	Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres hématologiques en fonction des : (A) Milieux. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons	21
16	Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres biochimiques en fonction des : (A) Milieux. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons	24
17	Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres immunologiques en fonction des : (A) Milieux. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons	26
18	Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres enzymatiques en fonction des : (A) Milieux. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons	29
19	Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres hématologiques : (A) Gr. (B) Gb. (C) Hb. (D) PCV, obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés.	31
20	Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres biochimiques : (A) les protéines totales. (B) les lipides totaux. (C) le glucose, obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés.	37
21	Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres immunologiques : (A) l'Activité lysozymique. (B) les immunoglobulines. (C) complément C3., obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés	40

22	Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres enzymologiques: (A) la catalase. (B) Superoxyde dismutase. (C) Alanine aminotransferase, obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés	43
-----------	--	-----------

Listes des tableaux:

N°	Titres	Page
I	Prototype d'une fiche technique synthétisant les conditions méthodologiques.	16
II	Prototype d'un tableau Excel regroupant les éléments relatifs aux nombres d'articles scientifiques en fonctions des espèces (cas de paramètres hématologiques).	17
III	Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres hématologiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.	18
IV	Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres biochimiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.	18
V	Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres immunologiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.	19
VI	Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres enzymatiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.	19
VII	Prototype d'un tableau Excel récapitulant les données relatives aux dosages des globules rouges dans le cas des paramètres hématologiques.	20

Liste des abréviations

a = amplitude ou écart d'amplitude

AST : Aspartate Aminotransférase

ALT : Alanine Amino-transférase

ALP : Alcaline Phosphatase

TCR : Récepteur des cellules T.

NCC : Neural Crest Cells (Cellules de la crête neurale)

NK : Natural killers (Les Cellules tueuses)

LAP: Leucine Amino-peptidase

Cd: Cadmium

Cr: Chromium (Chrome)

Cu : Cuivre

Pb : Plomb

Mn : Manganèse

Zn: Zinc

Ni: Nickel

Fe: Fer

As Arsenic

Hg: Mercure

CO: Cobalt

Ag-NPS: Nanoparticules d'Argent

INTRODUCTION

Introduction

Les poissons, d'après Bodiguel *et al.*, 2014 en tant qu'animaux vertébrés principalement aquatiques, occupent une place essentielle dans les écosystèmes marins en tant que consommateurs et proies, contribuant ainsi à l'équilibre écologique. Ils sont également une source importante de micronutriments et de minéraux nécessaires à l'homme, souvent absents dans d'autres types d'aliments.

Selon (Niemann, 2008 ; Azimi & Rocher, 2016; Laurent, 2013), les activités humaines ont introduit une variété de polluants dans les écosystèmes aquatiques, altérant la qualité de l'eau, sa dynamique et sa biodiversité.

Parmi ces polluants, on retrouve des agents comme les pesticides, parasites tels que les vers plats *Diphyllobotrium sp*, et virus comme le *Lymphocystis*, tous susceptibles de provoquer du stress chez les poissons (Gandar, 2017). Ce stress est une réponse adaptative essentielle face aux perturbations environnementales, impliquant des ajustements biochimiques, physiologiques et comportementaux pour maintenir l'homéostasie interne (Baudin, 2020). Les métaux lourds tels que le cuivre, le zinc et le plomb, ainsi que d'autres substances dans cette étude, sont également connus pour leurs effets néfastes sur les vertébrés, affectant leurs paramètres hématologiques, biochimiques, immunologiques et enzymologiques.

En raison de l'importance de ce volet de recherche à la fois pour les chercheurs universitaires, les gestionnaires des ressources aquacoles et les professionnels de l'aquaculture, il était primordial de mener une recherche bibliographique pour examiner les études scientifiques portant sur les effets des métaux lourds sur la physiologie des poissons.

Dans le cadre de cette étude, notre objectif principal est de présenter une analyse scientifique détaillée des conditions méthodologiques et résultats expérimentaux mettant en lumière l'impact de ces concentrations de métaux lourds sur la physiologie des différentes espèces de poissons. Cette analyse repose sur une approche méthodologique, incluant une analyse statistique pour traiter et interpréter les données issues d'articles scientifiques portant sur les perturbations des paramètres hématologiques, biochimiques, immunologiques et enzymologiques.

Cette approche permettra non seulement de mieux comprendre les mécanismes physiologiques altérés par les métaux lourds chez les poissons, mais également d'évaluer les conséquences potentielles de ces perturbations sur la santé et la performance des populations de poissons en environnement aquatique.

Introduction

Le manuscrit est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre expose une revue bibliographique générale sur les poissons et leur mécanismes physiologiques ainsi que l'impact des métaux lourds sur ses derniers. Le deuxième chapitre détaille l'approche méthodologique utilisée pour la collecte des articles scientifiques, ainsi que la compilation des conditions méthodologiques et des résultats expérimentaux présentés par les auteurs. Quant au dernier chapitre, il est divisé en deux parties. La première partie offre une description statistique des différentes conditions méthodologiques adoptées par les chercheurs dans les divers articles collectés, permettant ainsi d'avoir une vue d'ensemble des conditions expérimentales mentionnées. La seconde partie présente une analyse statistique des résultats scientifiques relatifs aux paramètres hématologiques, biochimiques, immunologiques et enzymologiques, accompagnée d'une argumentation scientifique visant à comprendre les répercussions des concentrations de métaux lourds sur ces paramètres chez différentes espèces de poissons.

Chapitre I
Revue bibliographique

1. Généralités sur les poissons

1.1. Définition

D'après Lévêque (2006) et Chakraborty & al. (2023), les poissons sont des animaux aquatiques à branchies, constituant le groupe le plus abondant de vertébrés avec environ la moitié des espèces à nageoires, souvent recouverts d'écailles. Ils ont colonisé quasiment tous les écosystèmes aquatiques, des océans aux lacs et aux rivières. (Delacourt, O.2021)

Les vertébrés appartiennent au Phylum Chordata, caractérisés par un endosquelette et une symétrie bilatérale, et incluent des animaux possédant des vertèbres osseuses ou cartilagineuses, notamment des épines (Renaud, S.2020). On les trouve ainsi dans une diversité de milieux (Figure 1).

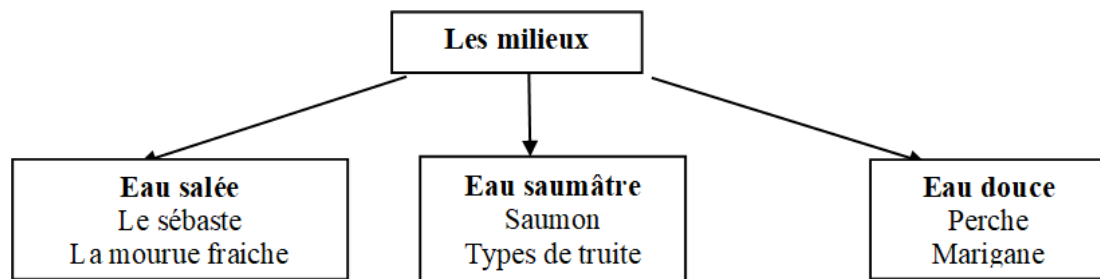


Figure 1 : Schéma explicatif des différents milieux qui abritent les poissons (figure originale)

Delannoy, 2007 ; Paugy & al., 2017 ont suggéré qu'il existe 25000 espèces de poissons dans le monde dont 60 % se trouvent dans les mers et 40 % dans l'eau douce. Cependant, quelques espèces rares peuvent migrées d'un milieu a un autre tels que les salmonidés, anguilles qui ont le pouvoir de repartir vers leurs milieux natals pour leur reproduction. De plus, ces êtres vivants sont des animaux à son froid et leur métabolisme dépend de la température de l'eau. Le corps des poissons peut être de différents aspects et cela nous aide à mieux comprendre leur mode de vie. (Figure 2)

Les travaux de Alomar (2017) ont rapporté que de nombreux vertébrés sauvages sont carnivores, mais leur régime alimentaire n'est pas fixe : ils consomment les organismes les plus abondants dans leur environnement. Leur alimentation et leurs proies varient à chaque stade de croissance, bien qu'ils ne digèrent pas tous les types d'aliments qu'ils semblent apprécier.

Chapitre I : Revue bibliographique

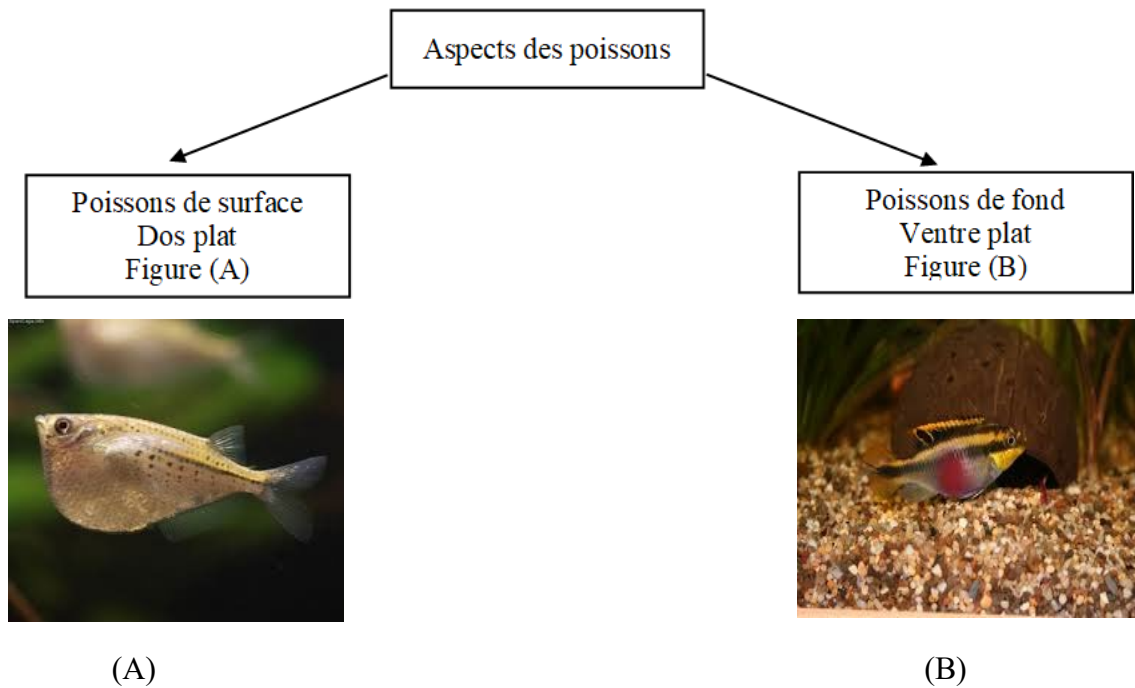


Figure 2 : Aspects des poissons : **(A)** *Carnegiella strigata*. **(B)** *Pelvicachromis pulcher* (Delannoy.2007)

1.2. Classification

Les poissons ne constituent pas un clade unique, par référence au travail de Oudot (2021), contrairement aux oiseaux et aux mammifères. Ils sont plutôt paraphylétiques, ce qui signifie qu'ils ne sont pas phylogénétiquement homogènes. Le terme « poissons » englobe plusieurs groupes distincts (Figure 3).

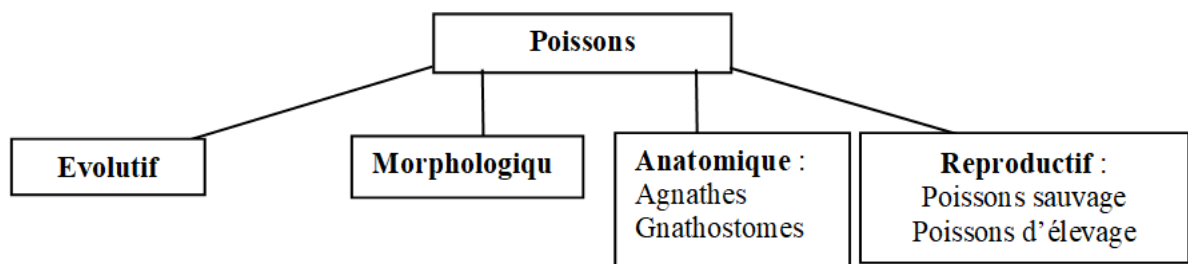


Figure 3 : Schéma explicatif des différents groupes de poissons (figure originale)

En outre, Lecointre et Le Guyader (2001) ont rapporté que les agnathes représentent les vertébrés dépourvus de mâchoire (les lamproies et les myxines). Les gnathostomes sont les

Chapitre I : Revue bibliographique

vertébrés possédant une double mâchoire réunissant la majorité des espèces actuellement existantes et qui se divisent en deux groupes (Figure 4).

:

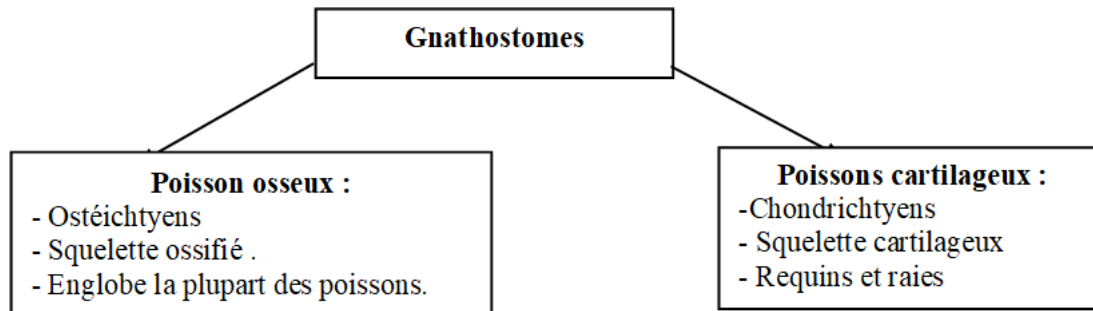


Figure 4 : Schéma explicatif des des Gnathostomes (figure originale)

1.3.Morphologie des poissons

La physiologie interne et externe de ces êtres est essentielle pour leur survie et leur fonctionnement dans l'environnement aquatique. Ils possèdent une anatomie complexe qui les aide à s'adapter à leur milieu de vie.

1.3.1. Morphologie externe

Branson (1993) divise la morphologie externe en trois régions :

- ✓ La région crânienne ou rostrale, elle comprend la tête jusqu'aux bords inférieurs de l'opercule.
- ✓ La région centrale (le tronc), elle va de l'opercule jusqu'à l'extrémité de la cavité péritonéale.
- ✓ La région caudale (la queue), elle s'étend de l'orifice urogénital jusqu'à l'extrémité postérieure de la nageoire caudale.

Ces trois régions sont toutes recouvertes par un seul et même organe « la peau », Qui est composé de deux couches :

- ✓ **Epiderme** : il sécrète un mucus très abondant qui favorise son glissement dans l'eau, d'une part diminue la résistance de l'eau due au frottement, et d'autre part offre un terrain difficile aux parasites qui veulent s'y fixer. Il constitue aussi une barrière efficace contre les substances toxiques les plus diverses. L'intégrité de cette peau muqueuse est essentielle à la régulation aqueuse du corps (Muus et Dahlstrom, 1991).
- ✓ La deuxième couche est le derme, qui est une structure plus complexe que l'épiderme du a sa composition. Il est beaucoup plus épais et contient les cellules pigmentaires,

Chapitre I : Revue bibliographique

vaisseaux sanguins, les nerfs, les cristallins des organes lumineux et le squelette dermique.

Pour mieux comprendre leur morphologie, nous allons nous intéresser aux autres organes externes, en se référant aux travaux de Levèque et Paugy (1984) et Bone & al. (2008), tels que :

- ✓ **La bouche** : Elle se positionne au bout du museau et varie d'un poisson à un autre. Elle peut être terminale ou en position inférieure et parfois dirigée vers le haut et dépend du genre de vie de la vertèbre par exemple un poisson ayant une bouche s'ouvrant vers le bas se nourrit de la faune ou les détritiques du fond à l'opposé des poissons ayant une bouche dirigée vers le haut qui indique que ce prédateur attaque ses proies par le bas.
- ✓ **Nageoires** : Soutenues par des rayons, sont des organes caractéristiques des poissons. La proportion, la position et la forme des nageoires sont en rapport avec la forme du corps et il existe une corrélation avec la manière de nager. L'équilibre du poisson dépend des effets compensateurs de ces différents organes. En premier lieu, nous avons les nageoires caudales (la queue) qui participent à la propulsion du poisson et elle existe sous six formes : pointue, arrondie, tronquée, en croissant et fourchette. Nous retrouvons aussi les nageoires anales et dorsales qui ont une fonction stabilisatrice, en vitesse lente ou à l'arrêt ou encore les nageoires pectorales et pelviennes qui permettent au poisson d'ajuster sa trajectoire. Enfin, nous retrouvons la nageoire adipeuse qui est présente chez certains poissons qui nous informe de la santé de l'être vivant lors du stress ou une maladie (Voir figure ci-dessous).

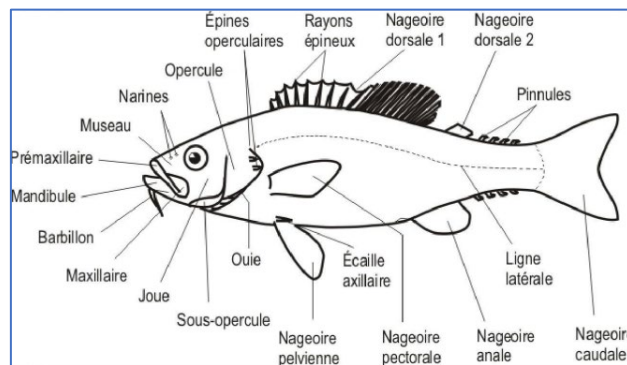


Figure 5 : Les caractéristiques externes générales d'un poisson (levèque et Paugy, 1984).

Chapitre I : Revue bibliographique

1.3.2. Anatomie interne :

En se basant sur les travaux de Loew & al. (1990), Muus et Dahlstrome (1991), Popper & al. (1993), Sneddon, (2003), Millsopp et Laming (2008), Ashley & al. (2009), les principales caractéristiques internes sont:

- ✓ **L'appareil sensoriel** : constitué des yeux qui sont placés latéralement et ne possèdent pas de paupières et fonctionnent très bien sous l'eau. Ces yeux sont composés de cristallin qui forme la lentille et qui est quasiment sphérique. Il concentre les rayons visuels au maximum, ce qui permet aux poissons de tout voir autour d'eux, vu que leur angle de vue approche du cercle complet, il atteint ainsi 300 degrés, ce qui leur offre une excellente vue de loin. Cependant, ce n'est pas le cas de la vue de près, car ces êtres vivants sont myopes du au cristallin. De même pour des oreilles, car l'ouïe des poissons dépend des ondes sonores qui parcourent le milieu où ils se trouvent, car le son circulant dans l'eau est trois fois plus rapide que dans l'air, ce qui leur permet d'avoir une audition remarquable. C'est de cet organe que partent les influx nerveux responsables des mouvements nécessaires à l'équilibre.
- ✓ **Le système nerveux** : Il a été démontré à de nombreuses reprises que la réaction à des stimuli douloureux, chez plusieurs espèces de poissons testées, ne sont pas de simples reflexes. Cette douleur peut influencer l'attention qu'ils prêtent à leur environnement, et l'apparition de certains comportements anormaux spécifiques semble cohérente avec l'existence d'une douleur consciente. Une publication de Dunlop & al. (2006) a montré également que les poissons rouges apprennent rapidement à éviter les zones de danger d'un aquarium ou ils reçoivent des chocs électriques et que plus ces derniers sont importants, plus ces poissons apprennent plus vite et s'en souviennent pour longtemps.
- ✓ **La ligne latérale** : le poisson possède une ligne latérale qui est un ensemble de capteurs sensoriels reliés au système nerveux pour se repérer dans l'univers qui l'entoure. C'est le siège du sens directionnel qui permet au poisson de localiser la provenance d'ondes de chocs produites par des mouvements dans l'eau et de les identifier (Figure 6).

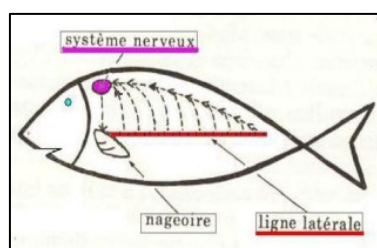


Figure 6 : La ligne latérale de poisson (Muus et Dahlstrome, 1988).

1.4. L'importance des poissons dans l'écosystème

Les vertébrés marins jouent un rôle essentiel au sein des écosystèmes marins, particulièrement dans les environnements tropicaux comme les lagunes. Ils facilitent le recyclage rapide des nutriments, ce qui est important pour la croissance et la reproduction de nombreuses espèces de poissons (Amara, 2011).

1. De plus et d'après Jugant Sophie, 2012., les poissons marins tropicaux, en étendant leur colonisation depuis des refuges tels que les récifs coralliens, influencent la répartition actuelle de la biodiversité marine, soulignant ainsi l'importance des habitats refuges dans la préservation de la diversité des espèces et le maintien de l'équilibre et de la productivité marine.

Les poissons récifaux, par leur déplacement et leur rôle dans le recyclage des nutriments, contribuent à maintenir la santé des écosystèmes coralliens en régulant la biomasse des macro algues et en fournissant des services écologiques essentiels, qui soutiennent la diversité exceptionnelle de ces poissons (Isabelle C. Biegala.,2015). En tant que consommateurs, prédateurs et proies, ils participent activement au bon fonctionnement des réseaux trophiques (Louise Day.,2020).

La diversité de leurs traits, façonnée par l'environnement, détermine la structure et la productivité des écosystèmes (Mathon, 2023). En outre, en plus de leur importance environnementale, les poissons marins sont une source vitale de nourriture pour de nombreuses communautés humaines à travers le monde, fournissant des protéines et des nutriments essentiels tout en contribuant au tourisme et à l'économie locale grâce à la pêche récréative (Van Hecke et Vanderleen, 2023).

Cependant, ces espèces font face à de multiples menaces, telles que la surpêche, la dégradation de l'habitat, l'utilisation de farines et d'huiles pour l'aquaculture, ainsi que la pollution et les espèces invasives, qui pourraient avoir des conséquences graves sur la biodiversité marine, y compris la disparition d'espèces (KUYPERS, Marine.,2009). De plus, ils peuvent perdre de leur diversité génétique en raison des changements physiologiques internes ou externes, exacerbant la pression sur les stocks de poissons sauvages déjà surexploités (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2010) 3ème édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique. Montréal, 94 pages).

2. Mécanismes physiologiques des poissons

2.1. Mécanisme hématoologique

Le cœur des poissons est uniquement veineux, car contrairement aux mammifères, il ne possède ni cœur droit veineux ni cœur gauche artériel. (Figures 7 et 9) (Cruveilhier,1867).

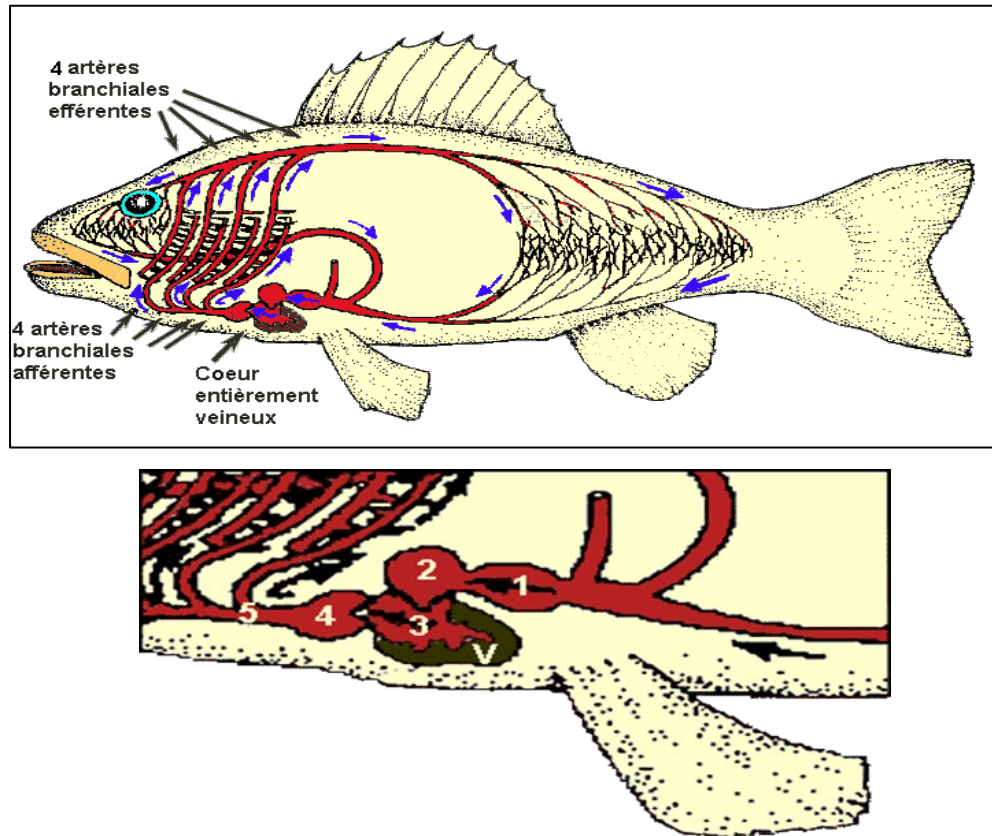


Figure 7 : Le système circulatoire et circulation sanguine chez le poisson
(<http://vieoceane.free.fr/paf/fichef2b.html>)

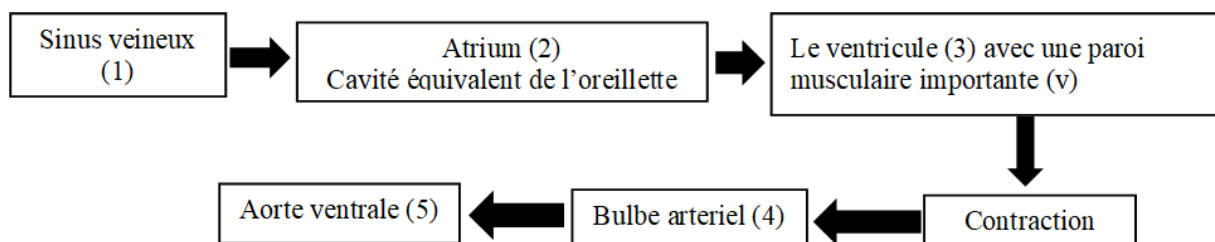


Figure 8 : Schéma explicatif de la circulation sanguine chez les poissons
(Figure originale)

2.2. Mécanisme biochimique

Dans des processus biochimiques propres à chaque espèce de poissons, l'énergie absorbée est progressivement transformée en énergie utile et dissipée sous forme de chaleur ou de travail chimique, osmotique et mécanique. C'est un ensemble de mécanismes physico-chimiques et biochimiques qui fournissent aux organismes l'énergie nécessaire au métabolisme (Meknachi Abdellah & al.,2022). Cette énergie peut être issue des lipides tels que le cholestérol et les triglycérides et protéines tels que l'Albumine et AST (aspartate aminotransférase), ALT (alanine aminotransférase), ALP (alcaline phosphatase) et même des carbohydrates tels que le glucose et bien plus encore. (Naïf & al., 2020).

Bien que le métabolisme lipidique et protéique soit similaire chez l'homme et le poisson, ces deux espèces se distinguent par l'importance des lipides et des protéines pour la reproduction et la croissance des poissons, ce qui dépend de leur alimentation et de leur stade de vie (Föhn, 2019). En revanche, chez l'homme, le métabolisme protéique et lipidique est plus complexe, impliquant des voies métaboliques spécifiques pour des fonctions telles que la reproduction, la sécrétion et les échanges intravasculaires des lipoprotéines (Frohn, R.,2019).

En outre, les différences dans le métabolisme glycosidique entre ces deux organismes vivants sont dues à leur évolution respective (Stern, 2007). Cependant, le mécanisme général de formation des liaisons glycosidiques est similaire chez les deux, impliquant un donneur de glycosyle, un accepteur et un agent activateur qui facilitent la liaison entre eux ((Laurent Cattiaux. 2021). Les mécanismes des protéines, des lipides et des glucides sont illustrés dans la figure ci-dessous.

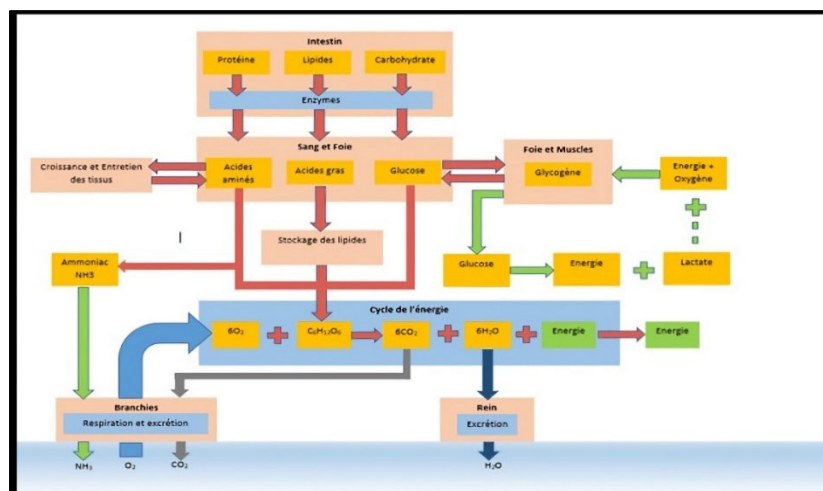


Figure 9 : Différents métabolismes et processus des protéines, lipides et glucose (Gabin, 2020).

2.3.Mécanisme immunologique

Depuis les débuts de l'immunologie, particulièrement à partir des années 1960, les chercheurs ont exploré les invertébrés et les vertébrés souvent désignés à tort comme "inférieurs", comme les poissons, selon Boudinot et Dorson (2018), leur objectif était d'approfondir la compréhension des mécanismes immunitaires fondamentaux en étudiant des systèmes plus simples. Les poissons possèdent des lymphocytes caractérisés par l'expression de récepteurs spécifiques d'antigènes tels que les immunoglobulines pour les lymphocytes B et les récepteurs TCR pour les lymphocytes T. En outre, ces lymphocytes expriment régulièrement des facteurs de transcription distinctifs durant leur développement, comme Ikaros, Pax5 et des membres de la famille GATA. Des cellules cytotoxiques non spécifiques (NCC) ont également été identifiées chez les poissons, similaires aux cellules tueuses (NK) chez les mammifères, capables de lyser des cellules humaines. On a observé différentes populations de NCC chez le poisson-chat *Ictalurus punctatus*, par exemple. Enfin, les poissons possèdent des macrophages, des granulocytes, des thrombocytes et des cellules qui partagent de nombreuses similitudes avec les cellules dendritiques des mammifères, jouant un rôle essentiel dans le développement des réponses immunitaires spécifiques. Ainsi, les principaux types cellulaires du système immunitaire des vertébrés sont présents chez les poissons (Figure 10).

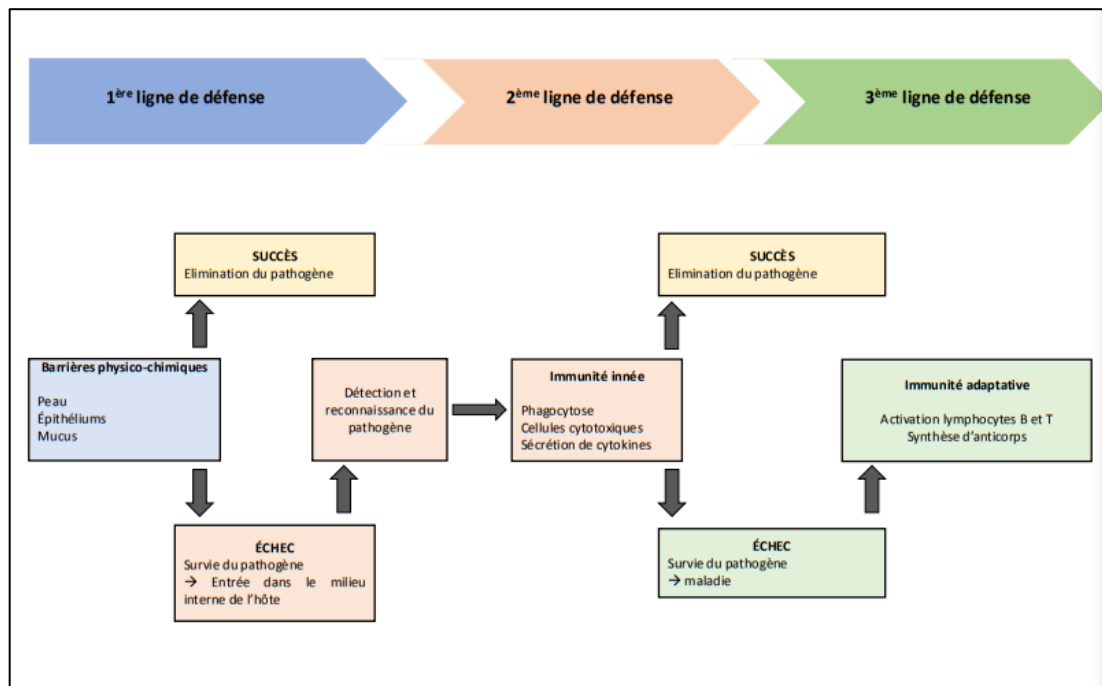


Figure 10 : Schématisation des trois lignes de défense présentes chez les poissons Téléostéens (Marchand, 2018).

2.4.Mécanisme enzymatique

Par référence aux travaux de Ribeiro & al. (1999), Lazo & al. (2000), Cahu et Zambonino (2007), il a été observé que les enzymes digestives pancréatiques, telles que l'amylase et la trypsine, apparaissent très rapidement durant l'ontogenèse et augmentent considérablement au cours des premiers jours de développement. La maturation de la digestion intestinale suit un processus précis : les enzymes cytosoliques, principalement des peptidases, diminuent au début, tandis que les enzymes de la bordure en brosse de l'intestin, comme la phosphatase alcaline, augmentent significativement. Le profil d'activité des enzymes digestives pendant le développement est génétiquement déterminé, bien que leur expression puisse être influencée par l'alimentation. Parmi ces enzymes, la phospholipase A2 chez les larves de bar est finement régulée par la teneur en phospholipides du régime alimentaire, de plus, les larves de bar présentent des enzymes digestives pancréatiques et intestinales qui sont détectables dès les premiers stades de développement. Notamment, l'activité de deux enzymes pancréatiques, la trypsine et l'amylase, a été observée chez des larves âgées de 3 jours, même avant l'ouverture de leur bouche. Pour d'autres espèces de poissons telles que l'ombrine *Sciaenops ocellatus* et la sole sénégalaise *Solea senegalensis*, la trypsine est détectée dès le premier jour.

Il est essentiel de noter que, selon Henning (1987), la synthèse de ces enzymes digestives ne dépend pas exclusivement de l'ingestion alimentaire à ce stade précoce. Les activités spécifiques de toutes les enzymes digestives mesurées dans l'ensemble des larves suivent un schéma similaire tout au long de leur développement : elles augmentent significativement dès la première alimentation, maintiennent un niveau élevé jusqu'à environ le 25e jour, puis diminuent progressivement (voir Figure 11). À partir du jour 30, elles se stabilisent à un niveau plus bas (Zambonino et Cahu, 1994). Cette diminution ne correspond pas à une baisse totale d'enzymes, mais plutôt à une augmentation générale des protéines dans l'organisme. En termes de capacité enzymatique par rapport à leur poids, les larves de bar montrent donc une efficacité considérable. Ce profil d'activité des enzymes digestives est également observable chez d'autres espèces appartenant à différents embranchements tels que les crustacés et les mammifères, reflétant l'établissement des enzymes digestives durant la période postnatale.

Quant à la pepsine, une enzyme gastrique, sa quantification n'a été possible selon Zambonino et Cahu (1994), qu'à partir du jour 25, correspondant au moment où l'estomac devient fonctionnel (Figure 11)

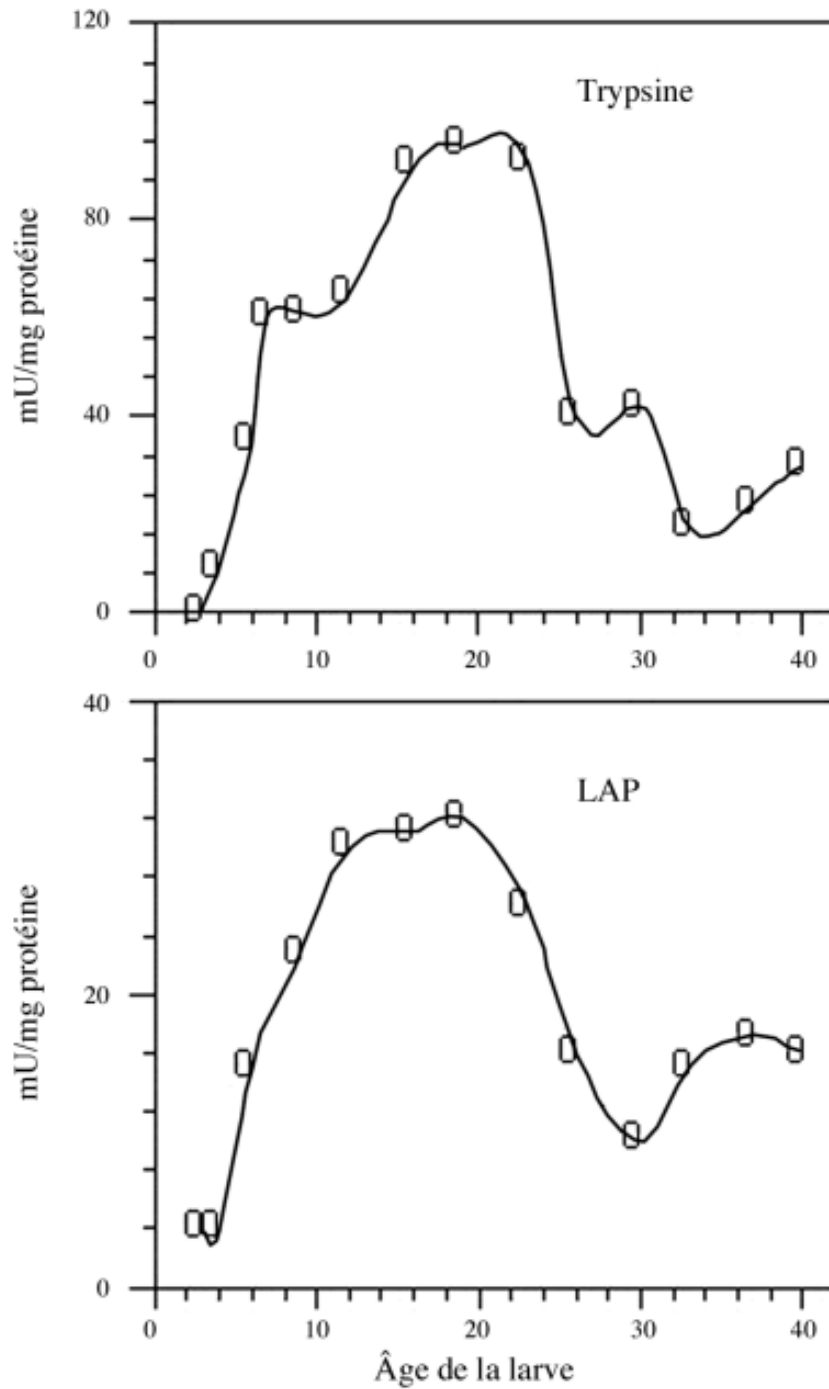


Figure 11 : Evolution d'une enzyme pancréatique, la trypsine, et d'une enzyme intestinale, la leucine aminopeptidase (lap), au cours du développement de la larve de bar (dosées sur des larves entières broyées et homogénéisées) (Zambonino et Cahu, 1994).

3. Impact des métaux lourds sur les poissons

D'après Mlle. Hafdallah Bouthayna & al., 2022, le terme « métal lourd » désigne généralement tous les éléments métalliques naturels (métaux ou métalloïdes) ayant une masse volumique supérieure à 5 g/cm³. Cependant, Biney & al. (1995) et Di & al. (1997) rapportent que sur le plan scientifique et technique, ces éléments se distinguent non seulement par leur masse volumique élevée, mais aussi par un numéro atomique généralement supérieur à celui du sodium ($Z = 11$) et leur toxicité pour les systèmes biologiques. Une fois introduits dans l'environnement aquatique, les métaux se répartissent entre les différents composants de l'eau et peuvent se présenter sous forme de complexes, de particules ou même en solution.

Les poissons sont particulièrement sensibles aux effets toxiques causés par l'absorption de ces métaux, l'eau étant un solvant polaire très efficace pour de nombreux composés chimiques (Mehrle et Mayer, 1985).

Les travaux de Larsson & al. (1981) et Rand (1985) précisent que les effets les plus remarquables sont principalement physiologiques et biochimiques lorsque les concentrations de ces composés sont élevées.

Par exemple, Larsson & al., 1981 a rapporté que le cadmium est souvent associé à une hypersensibilité, des mouvements natatoires non coordonnés et une léthargie. Le mercure peut se retrouver dans le cerveau, le foie, les reins et les intestins, tandis que le plomb peut entraîner des problèmes neurologiques, cardiovasculaires et immunologiques, même à faible dose. (Suratno, R Puspitasari, R. Rositasari and S. Oktaviyani 2019).

Chez les espèces aquatiques, il a été observé des dommages aux membranes respiratoires ainsi qu'une asphyxie due à la réaction des ions métalliques avec les constituants du mucus sécrété par les branchies (Leland et Kuwabara, 1985). Les métaux lourds peuvent s'accumuler dans les poissons occupant des niveaux trophiques élevés dans les milieux marins, compromettant leur valeur nutritionnelle en raison des graves séquelles qu'ils peuvent causer à la santé humaine par l'alimentation (Ezemonye & al., 2019; Okogwu & al., 2019).

Chapitres II
Approches méthodologiques

Chapitre II : Approches méthodologiques

1. Approche 1 : Collecte des articles scientifiques

1.1. Recherche en ligne

Pour cette partie, nous avons basé notre recherche sur différents articles que nous avons récoltés à partir de plusieurs moteurs de recherche tels que « Google Scholar » (Figure 12), sur une période de 15 jours. Cela nous a permis d'obtenir une panoplie de documents se référant à l'effet des métaux lourds sur les paramètres hématologiques, biochimiques, immunologiques et enzymologiques chez différentes espèces de poissons.

Les mots clés ont été soigneusement choisis et désignés afin d'obtenir les résultats de recherche les plus pertinents possibles, en accord avec les objectifs de notre travail. Cette démarche nous a permis de nous concentrer sur la reconnaissance d'articles rédigés en anglais, ouvrant ainsi les portes à une vaste documentation bibliographique en ligne gratuite. Cependant, une contrainte de temps a limité notre capacité à rechercher d'autres articles nécessitant un paiement pour un accès complet.

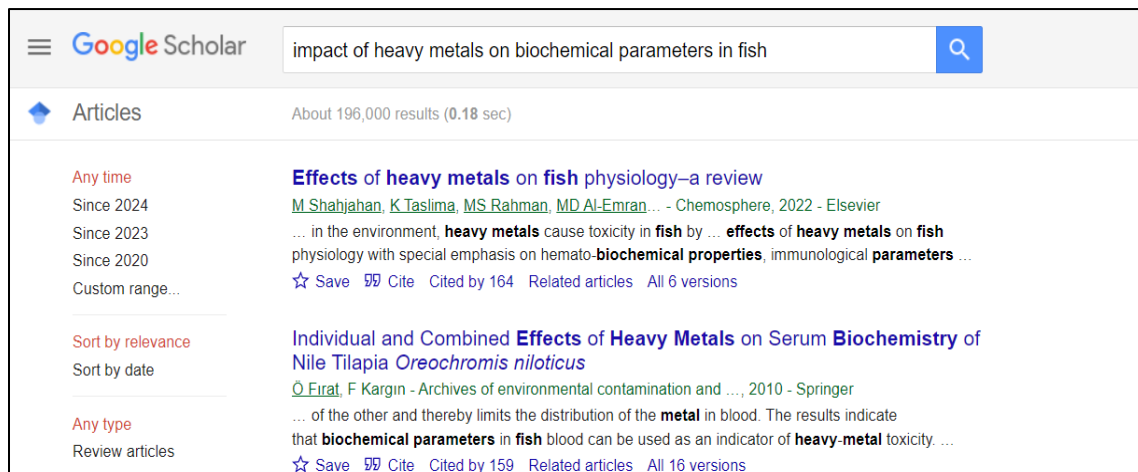


Figure 12 : Recherche en ligne via Google Scholar (Photo originale).

1.2. Classement des articles

Après le téléchargement des articles, nous avons méthodiquement classé les informations en fonction des quatre catégories de paramètres étudiés (hématologiques, biochimiques, immunologiques, enzymologiques).

Cette approche structurée nous a permis de créer quatre bases de données bien distinctes, chacune rassemblant les études adéquates pour une catégorie spécifique de paramètres (Figure 13).

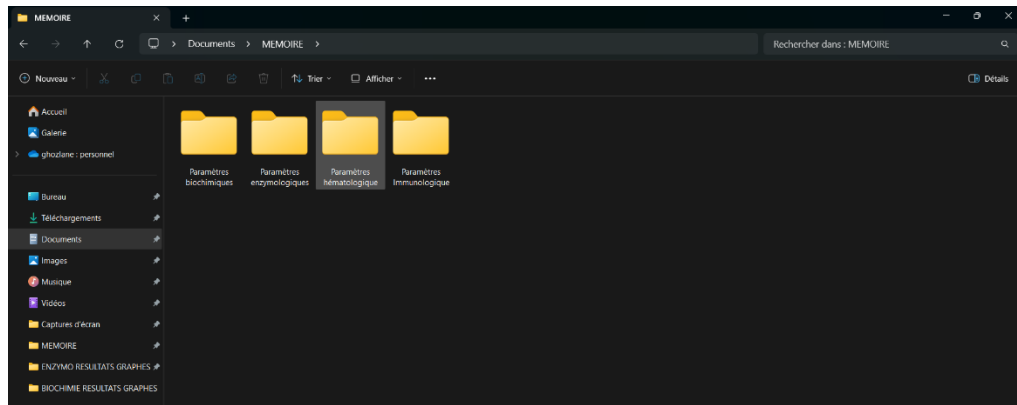


Figure 13 : Classement des articles dans différents dossiers (Photo originale).

2. Approche 2 : Collecte des conditions méthodologiques

Pendant 20 jours, nous avons procédé à un examen approfondi des articles qui traitent des paramètres hématologiques, biochimiques, immunologiques et enzymatiques dont l'objectif était de prélever les détails méthodologiques entrepris par les auteurs de chaque étude scientifique.

Cette collecte offre l'ensemble des conditions dans lesquelles les recherches avaient été réalisées. Cela incluait les milieux d'études (Sauvage, laboratoire ou mixte), le pays d'étude, les types de métaux lourds et de poissons ciblés ou encore l'effectif des poissons contaminés et non contaminés (control).

2.1. Fiche technique

Les informations collectées ont été structurées sous forme de tableau (Tableau I). Chaque colonne correspondait à une condition méthodologique bien précise tandis que chaque ligne représentait un article scientifique bien distinct ce qui a permis de réaliser quatre fiches techniques distinctes correspondant à une base d'articles étudiée. Au commencement, ce travail était sous forme de fiches cartonnées (Figure 14).

Tableau I : Prototype d'une fiche technique synthétisant les conditions méthodologiques.

Articles	Milieux	Pays	Nom du métal	Espèces de poissons	Effectifs des poissons	
					Control (C)	Contaminés (Ct)
Art. 1						
Art. 2						
Art. 3						
...						

Chapitre II : Approches méthodologiques

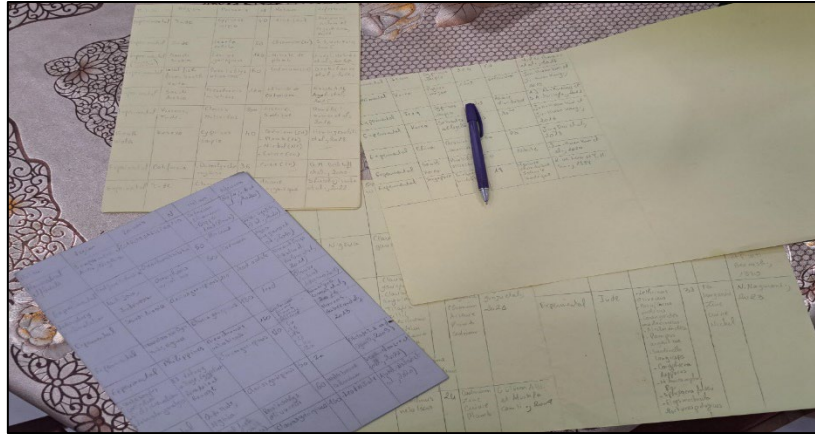


Figure 14 : Synthèse des conditions méthodologiques sur des fiches cartonnées (Photo originale).

2.2. Tableaux Excel

Les données ont été transférées depuis 4 fiches techniques initiales sous forme d'un tableau Excel. Dans cette version électronique, chaque tableau correspondait à un élément méthodologique spécifique alors que la deuxième colonne se référait aux articles qui ont utilisé cet élément. Ce tableau ci-dessous montre le prototype de ce format Excel qui éclaire l'organisation des données méthodologiques extraites des articles examinés et les préparant à l'analyse statistique (Tableau II).

Tableau II : Prototype d'un tableau Excel regroupant les éléments relatifs aux nombres d'articles scientifiques en fonctions des espèces (cas de paramètres hématologiques).

Espèces de poissons	Nombre d'études
<i>Clarias gariepinus</i>	6
<i>Oreochromis niloticus</i>	4
<i>Paralichthys olivaceus</i>	1
<i>Channa punctatus</i>	2
<i>Labeo rohita</i>	2
<i>Cyprinus carpio</i>	3
<i>Tilapia mossambica</i>	1

3. Approche 3 : Collecte des résultats expérimentaux

Cette tâche s'est étalée sur une période de 60 jours durant laquelle nous avons collecté les résultats expérimentaux des différents articles obtenus par divers auteurs et qui concernait des analyses effectuées sur plusieurs espèces de vertébrés (contaminés et control) issus de différents

Chapitre II : Approches méthodologiques

environnements. Ces êtres vivants ont fait l'objet d'analyses et de dosages spécifiques de paramètres physiologiques prédéfinis dans le cadre de cette étude.

Il est important de souligner que dans cette partie du travail, les unités de mesure ont toutes été unifiées vers une seule pour faciliter les comparaisons convaincantes entre les différentes publications. Cette unification des unités est primordiale pour mener à bien l'analyse précise et logique des données collectées sur ces populations de poissons.

Comme pour la récolte des conditions méthodologiques, nous avons réalisé le même travail pour les données expérimentales de chaque paramètre et qui a été initialement sous forme de fiches cartonnées.

3.1. Fiche technique des paramètres hématologiques

Pour les paramètres hématologiques, nous avons choisi les 4 dosages les plus enregistrés par les auteurs qui sont comme suit, les globules rouges Gr (Cellules/mm³), les globules blancs Gb (10⁶/mm³), Hémoglobine (g/dl), Hématocrite (PCV %). (Tableau III).

Tableau III : Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres hématologiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.

Articles	Gr (Cellules/mm ³)		Gb (Cellules/mm ³)		HB (g/dl)		PCV %	
	C	Ct	C	Ct	C	Ct	C	Ct
Art. 1								
Art. 2								
Art. 3								
...								

3.2. Fiche technique des paramètres biochimiques

Pour les paramètres biochimiques, nous nous sommes intéressées aux 3 dosages les plus enregistrés par les auteurs qui sont comme suit : les protéines totales (mg/dl), les lipides totaux (mg/dl) et le glucose (mg/dl) (Tableau IV).

Tableau IV : Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres biochimiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.

Articles	Protéines totales (mg/dl)		Lipides totaux (mg/dl)		Glucose (mg/dl)	
	C	Ct	C	Ct	C	Ct
Art. 1						
Art. 2						
Art. 3						
...						

Chapitre II : Approches méthodologiques

3.3. Fiche technique des paramètres immunologiques

Pour les paramètres immunologiques, nous nous sommes basées sur l'analyse de 3 dosages les plus enregistrés dans les articles qui sont comme suit : l'Activité lysozymique (U/ml), les immunoglobulines (mg/ml) et le complément C3 (mg/ml) (Tableau V).

Tableau V : Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres immunologiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.

Articles	l'Activité lysozymique (%)		immunoglobulines (%)		Complément C3 (%)	
	C	Ct	C	Ct	C	Ct
Art. 1						
Art. 2						
Art. 3						
...						

3.3. Fiche technique des paramètres enzymologiques

Pour les paramètres enzymologiques, nous nous sommes intéressées aux 4 dosages les plus enregistrés par les auteurs qui sont comme suit : la catalase (CAT) (mg/dl), la Superoxyde dismutase (mg/dl) et Alanine aminotransferase (mg/dl) (Tableau VI).

Tableau VI : Prototype d'une fiche technique synthétisant les dosages liés aux paramètres enzymatiques les plus documentés dans les articles scientifiques étudiés.

Articles	Catalase (CAT) (mg/dl)		Superoxyde dismutase (mg/dl)		Alanine aminotransferase (mg/dl)	
	C	Ct	C	Ct	C	Ct
Art. 1						
Art. 2						
Art. 3						
...						

3.4. Tableaux Excel

Pour cette troisième approche, les quatre fiches techniques ont été structurées également en tableaux Excel, chaque fiche étant divisée en plusieurs tableaux correspondant à chaque type de dosage. Chaque tableau était conçu avec une première colonne dédiée aux articles scientifiques et deux autres colonnes indiquant les résultats expérimentaux des dosages spécifiques de chaque paramètre pour les poissons contaminés et le control. Le Tableau VII illustre un exemple de ce format Excel, mettant en évidence la méthodologie d'organisation des données issues des articles examinés en vue de leur analyse statistique ultérieure.

Chapitre II : Approches méthodologiques

Tableau VII : Prototype d'un tableau Excel récapitulant les données relatives aux dosages des globules rouges dans le cas des paramètres hématologiques.

Articles	Globules rouges Gr (Cellules/mm ³)	
	C	Ct
Art. 1	3,8	2,14
Art. 2	1,39	0,97
Art. 3	1,38	1,27
...		

4. Traitement statistique

Dans la première partie de notre analyse selon l'approche 2, nous nous sommes concentrés sur les aspects méthodologiques des études collectées. Nous avons utilisé le logiciel Excel pour créer des visualisations graphiques sous forme d'histogrammes. Ces représentations graphiques ont été essentielles pour examiner les éléments issus de quatre tableaux distincts, chacun référant à des paramètres spécifiques (hématologiques, biochimiques, immunologiques et enzymatiques) donc un total de 16 histogrammes. Chaque histogramme était accompagné d'une analyse numérique en précisant le calcul des erreurs types ($N \pm ET$), permettant ainsi de mieux comprendre les variations obtenues en fonction des techniques adoptées par les différents auteurs.

Afin d'approfondir l'analyse des résultats expérimentaux, nous avons également utilisé des histogrammes générés à partir de 13 tableaux Excel mentionnés précédemment. Ces visualisations graphiques nous ont permis d'examiner les éléments issus de divers tableaux. Le calcul des erreurs types et l'évaluation des écarts d'amplitude a été employés pour mieux assimiler les écarts entre les résultats obtenus.

L'évaluation de la significative statistique a été réalisée par le test de de conformité de Student, par comparaison des moyennes d'échantillons contaminés par rapport au control, au seuil d'erreur de 5%.

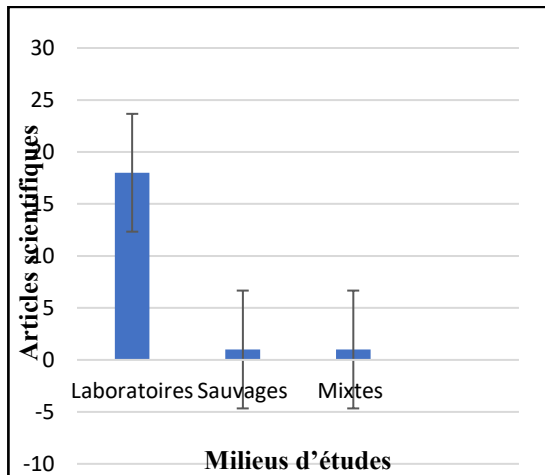
Chapitre III
Résultats statistiques et
argumentations scientifiques

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

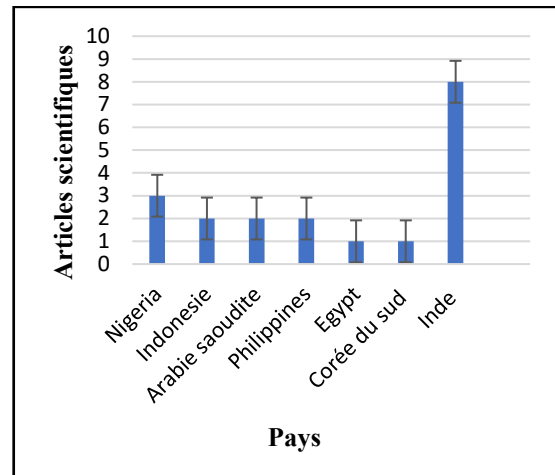
1. Résultats statistiques des conditions méthodologiques

1.1. Les paramètres hématologiques

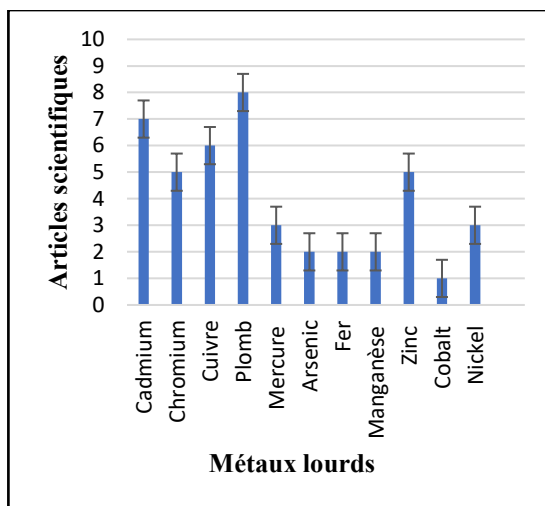
Les résultats statistiques de l'analyse des conditions méthodologiques (milieux, pays, métaux lourds et espèces de poissons) adoptées par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, portant sur les paramètres hématologiques, sont illustrés par la figure ci-dessous.



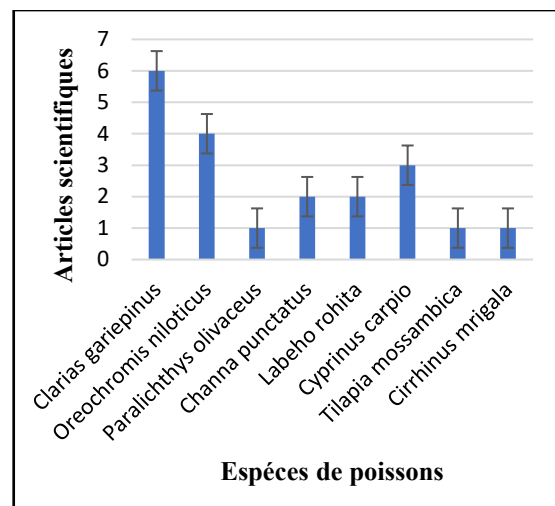
(A)



(B)



(C)



(D)

Figure 15 : Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres hématologiques en fonction des : (A) Milieux. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

1.1.1. Lecture des résultats

D'après cette représentation graphique, nous remarquons que le milieu d'études le plus important est le milieu expérimental (laboratoire) avec un pourcentage de 90 % (18 ± 3.13) suivi des milieux sauvages et mixtes avec 5% chacun (1 ± 3.13) (Figure 14A).

La région où le plus d'études ont été réalisées est l'Inde avec un pourcentage de 42.10% (8 ± 1.55) suivis du Nigeria avec 15.78 % (3 ± 1.55), Indonésie 10.50 % (2 ± 1.55), Arabie saoudite et les Philippines 10.50% chacune (2 ± 1.55) et enfin l'Égypte et la Corée du Sud 5.26 % (1 ± 1.55) (Figure 14B).

Les métaux lourds les plus répandus dans ces régions est le plomb 18.18 % (8 ± 1.52) suivi du cadmium 15.90 % (7 ± 1.52) puis le cuivre 13.63 % (6 ± 1.52) ensuite chromium et zinc 11.36 % chacun (5 ± 1.52) puis le mercure et nickel 6.81 % (3 ± 1.52) par la suite arsenic, fer et manganèse 4.54 % chacun (2 ± 1.52) et enfin le cobalt 2.27 % (1 ± 1.55) (Figure 14C).

L'espèce de poissons qu'on retrouve le plus est *Clarias gariepinus* avec 30 % (6 ± 1.33) puis *Oreochromis niloticus* avec 20 % (4 ± 1.33) suivi de *Cyprinus carpio* 15 % (3 ± 1.55) ensuite *Channa punctatus* et *Labeo rohita* avec 10% chacune (2 ± 1.33) et enfin *Paralichthys olivaceus*, *Tilapia mossambica* et *Cirrhinus mrigala* avec 5% (1 ± 1.33) (Figure 14D).

1.1.2. Argumentations scientifiques

Selon les données extraites, le milieu d'étude prédominant pour évaluer les effets des métaux lourds sur les paramètres hématologiques des poissons est le milieu expérimental (laboratoire). Ce choix est souvent motivé par la nécessité de contrôler précisément les conditions expérimentales afin de mesurer spécifiquement l'impact des métaux lourds sur des indicateurs hématologiques tels que la numération des globules rouges, le taux d'hémoglobine, et les indices érythrocytaires (Saini & al., 2018). Cependant, les études menées en milieux sauvages et mixtes sont essentielles pour comprendre comment ces contaminants affectent les poissons dans leur habitat naturel, où les interactions avec d'autres stress environnementaux peuvent modifier les réponses hématologiques observées.

Les résultats montrent une concentration significative des études en Inde, suivie par le Nigeria, l'Indonésie et l'Arabie saoudite. Cette répartition géographique met en évidence les différences dans les profils de contamination par les métaux lourds et les priorités de recherche selon les régions, influencées par les pratiques industrielles, minières et agricoles locales (Pandey & al., 2020).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Ce qui concerne les métaux lourds les plus fréquemment étudiés pour leur impact sur les paramètres hématologiques des poissons, Javed & al., 2017, ont inclus le plomb en premier rang, suivi du cadmium, le cuivre, le chrome et le zinc. Ces contaminants sont connus pour leur capacité à perturber la formation des cellules sanguines, la fonction hématopoïétique, et la réponse immunitaire chez les poissons, avec des conséquences potentielles sur leur santé et leur fitness.

En revanche, les espèces les plus fréquemment étudiées pour évaluer les effets des métaux lourds sur leurs paramètres hématologiques sont *Clarias gariepinus*, *Oreochromis niloticus* et *Cyprinus carpio*. (Tchounwou & al., 2021). D'après Tchounwou & al., 2021, ces choix d'espèces sont souvent guidés par leur disponibilité, leur importance économique et leur rôle écologique dans les écosystèmes aquatiques, fournissant des modèles diversifiés pour étudier les réponses hématologiques aux métaux lourds.

1.2. Les paramètres biochimiques

Les résultats statistiques de l'analyse des conditions méthodologiques (milieux, pays, métaux lourds et espèces de poissons) adoptées par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, portant sur les paramètres biochimiques, sont illustrés par la figure ci-dessous.

1.2.1. Lecture des résultats

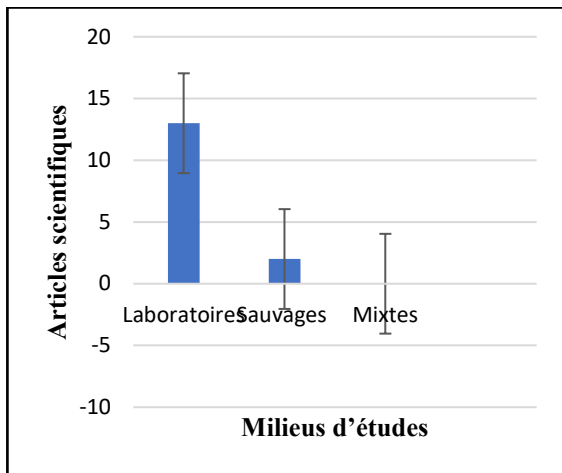
D'après cette représentation graphique, nous remarquons que le milieu d'étude le plus important est le milieu expérimental (laboratoire) également avec un pourcentage de 86.66 % (13 ± 2.64) suivi des milieux sauvages 13.33 % (2 ± 2.64) et aucune étude en milieu mixtes (Figure 15A).

La région où le plus d'études ont été réalisées est l'Inde avec un pourcentage de 26.66 % (4 ± 0.98) suivis de l'Arabie saoudite et Turquie 13.33 % (2 ± 0.98) puis Indonésie, Corée du sud, Kosovo, Californie, Iran, Nigeria et enfin l'Égypte avec un pourcentage de 6.66 % (1 ± 0.98) (Figure 15B).

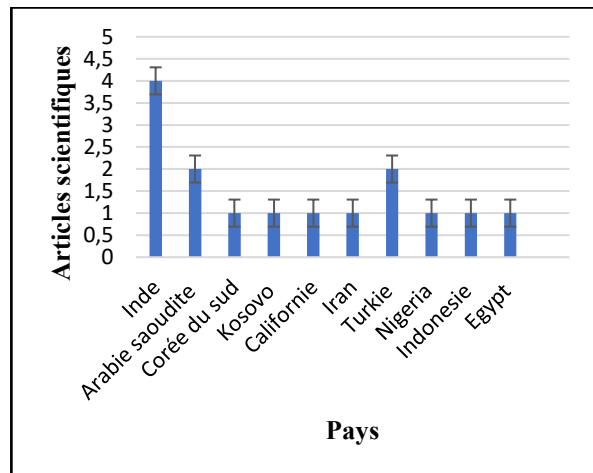
Quant aux métaux lourds les plus répandus dans ces régions sont le plomb, chrome, cadmium, cuivre avec un pourcentage de 16 % (4 ± 1.16) suivi du zinc, mercure et Ag-NPS 8 % (2 ± 1.16) et enfin l'arsenic, nickel, sélénite à 4 % (1 ± 1.16) (Figure 15C).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

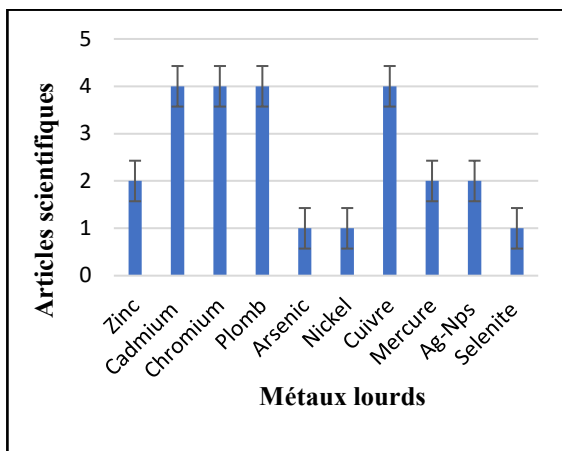
Pour l'espèce de poissons qu'on retrouve le plus ; il s'agit de *Oreochromis niloticus* en premier rang avec 26.66 % (4 ± 1.03) suivi de *Cyprinus carpio* avec 20 % (3 ± 1.03) puis *Clarias gariepinus*, *Clarias batrachus* et *Onchorhynchus mykiss* à 13.33 % (2 ± 1.03) et en dernière place *Labelo rohita* et *Paralichlys olivaceus* à 6.66 % (1 ± 1.03) (Figure 15D).



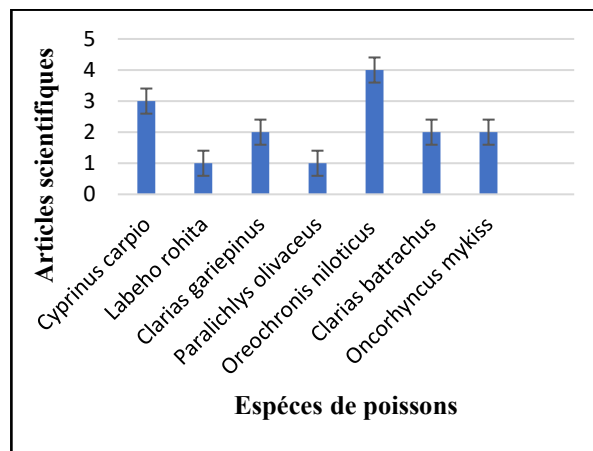
(A)



(B)



(C)



(D)

Figure 16 : Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres biochimiques en fonction des : (A) Milieus. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

1.2.2. Argumentations scientifiques

Pour les paramètres biochimiques, le milieu d'étude prédominant est le milieu expérimental (laboratoire) tel noté pour les paramètres hématologiques. Cette préférence pour les conditions contrôlées en laboratoire permet de standardiser les protocoles expérimentaux et de mesurer précisément les effets des métaux lourds sur les paramètres biochimiques comme les enzymes hépatiques, les marqueurs de stress oxydatif et les profils métaboliques (Nguyen & al., 2019). En revanche, les études en milieux sauvages sont essentielles pour évaluer les effets réels des métaux lourds dans des conditions naturelles, où les interactions complexes avec d'autres contaminants et facteurs environnementaux peuvent influencer les réponses biochimiques observées.

Cependant, les résultats en études biochimiques montrent que l'Inde est la région où le plus grand nombre d'études ont été réalisées, suivie par l'Arabie saoudite et la Turquie. Pour Wong & al., 2020, cette répartition géographique reflète les différences dans les niveaux de contamination par les métaux lourds et les priorités de recherche, souvent influencées par les activités industrielles, minières et agricoles spécifiques à chaque région.

Ce qui est des métaux lourds les plus fréquemment étudiés pour leur impact sur les paramètres biochimiques des poissons comprennent le plomb, le chromium, le cadmium et le cuivre, Selon Li & al., 2018, ces métaux sont connus pour perturber divers processus biochimiques, tels que la fonction hépatique, la régulation du métabolisme et la réponse immunitaire des poissons, avec des implications potentielles pour leur santé et leur survie.

Les espèces les plus fréquemment étudiées pour évaluer les effets des métaux lourds sur leurs paramètres biochimiques sont essentiellement *Oreochromis niloticus*, *Cyprinus carpio* et *Clarias gariepinus*. Ces choix d'espèces sont aussi souvent basés sur leur disponibilité, leur résistances face aux contaminants et leur importance économique et écologique dans les écosystèmes aquatiques étudiés (García-Negrete & al., 2021).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

1.3. Les paramètres immunologiques

Les résultats statistiques de l'analyse des conditions méthodologiques (milieux, pays, métaux lourds et espèces de poissons) adoptées par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, portant sur les paramètres immunologiques, sont illustrés par la figure ci-dessous.

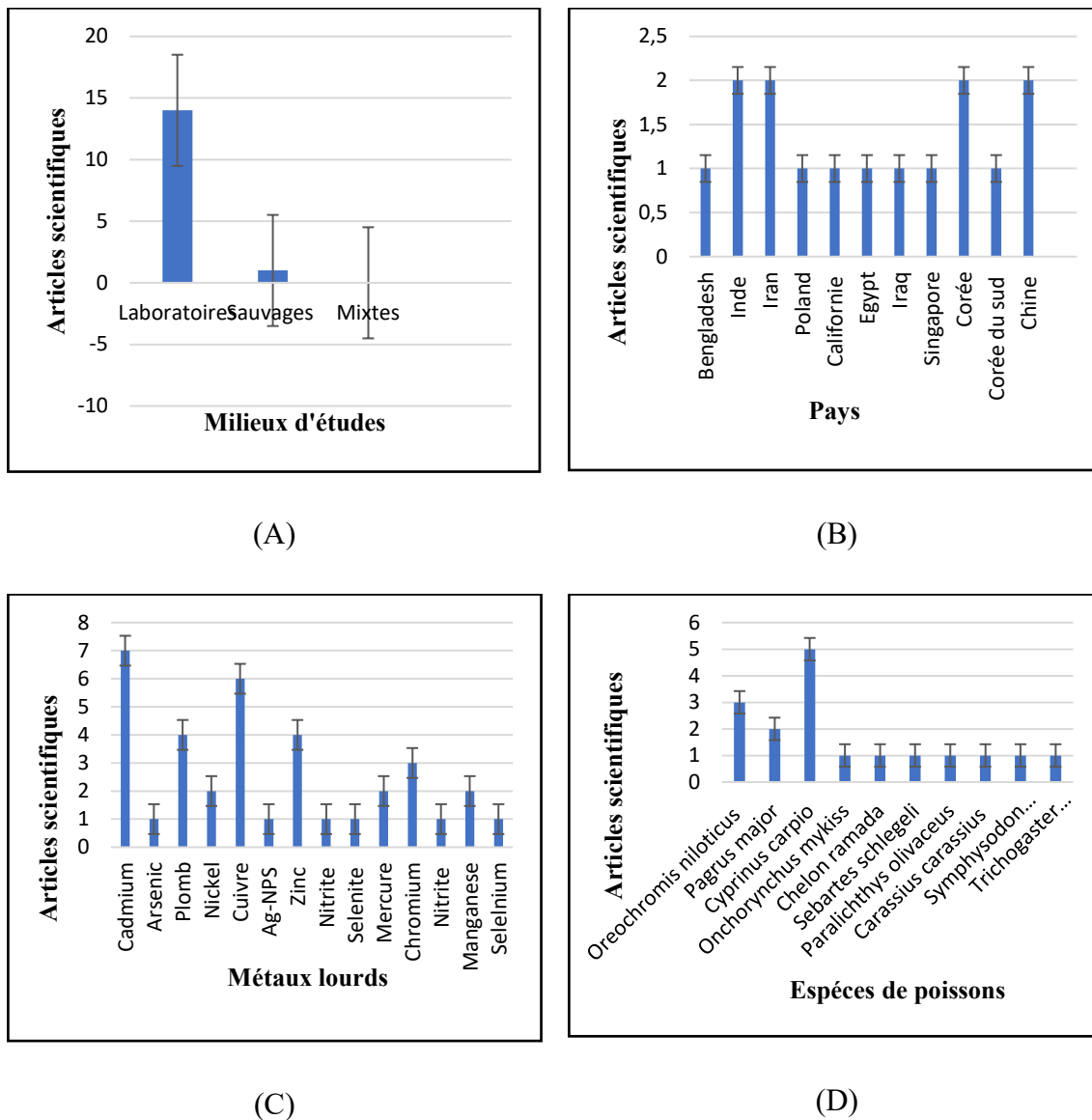


Figure 17 : Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres immunologiques en fonction des : (A) Milieux. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

1.3.1. Lecture des résultats

D'après ces graphes, on aperçoit que le milieu d'étude le plus utilisé est le milieu expérimental (laboratoire) toujours avec un pourcentage de 93.33% (14 ± 2.79) suivi des milieux sauvages 6.66 % (1 ± 2.79) et aucune étude en mixtes (Figure 16A).

Les régions où le plus d'études ont été réalisées sont l'Inde, l'Iran, Chine et Corée avec un pourcentage de 13.33 % chacune (2 ± 0.71) suivis du Bangladesh, Pologne, Californie, Egypte, Iraq, Corée du sud et enfin Singapour avec un pourcentage de 6.66 % chacune (1 ± 0.71) (Figure 16 B).

Les métaux lourds les plus répandus dans ces régions sont le cadmium avec un pourcentage de 18.42 % (7 ± 1.41) suivi du cuivre à 15.78 % (6 ± 1.41) puis le plomb et le zinc à 10.52 % chacun (4 ± 1.41) puis le fer et le chromium à 7.89 % chacun (3 ± 1.41) ensuite le mercure, manganèse et nickel à 5.26 % chacun (2 ± 1.41) enfin le nitrite et le sélénite, le sélénium, arsenic, Ag-Nps à 2.63 % chacun (1 ± 1.41) (Figure 16C).

L'espèce de poissons qu'on retrouve le plus est *Cyprinus carpio* 29.41 % (5 ± 1.15) puis *Oreochromis niloticus* 17.64 % (3 ± 1.15) suivis de *Onchorhyncus mykiss*, *Paralichlys olivaceus*, *Sebastes schlegelii*, *Carassius*, *Pagrus major*, *Chelon ramada*, *Symphysodon aequifasciatus* et enfin *Trichogaster trichopterus* à 5.88 % chacune (1 ± 1.15) (Figure 16D).

1.3.2. Argumentations scientifiques

Les données analysées indiquent que le milieu d'étude prédominant est le milieu expérimental (laboratoire) toujours. Ce choix méthodologique est essentiel car il permet un contrôle rigoureux des conditions expérimentales, facilitant ainsi la mesure précise des effets des métaux lourds sur les réponses immunologiques des poissons, telles que la modulation des cytokines, des anticorps et des cellules immunitaires (Adams & al., 2019). En revanche, les études en milieux sauvages représentent seulement 6.66%, bien que leur importance réside dans la capacité à évaluer les réponses immunitaires dans des conditions environnementales réalistes et variées.

Les régions où la majorité des études ont été réalisées comprennent l'Inde, l'Iran, la Chine et la Corée. Cette distribution géographique reflète les préoccupations mondiales concernant la contamination par les métaux lourds et leurs effets sur la santé des écosystèmes

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

aquatiques, ainsi que les différences dans les réglementations environnementales et les activités industrielles (Croteau & al., 2020).

Les métaux lourds les plus étudiés pour leur impact sur les paramètres immunologiques des poissons incluent le cadmium en premier, suivi du cuivre, plomb et du zinc. D'après Santos & al., 2018, ces métaux peuvent interférer avec les fonctions immunitaires des poissons en perturbant les voies de signalisation cellulaires, en augmentant le stress oxydatif et en modifiant la composition des communautés microbiennes essentielles à la santé immunitaire.

Les espèces les plus fréquemment étudiées pour évaluer les effets des métaux lourds sur leurs paramètres immunologiques sont *Cyprinus carpio* et *Oreochromis niloticus*. Ces espèces sont choisies en raison de leur prévalence dans les écosystèmes aquatiques affectés par la pollution, ainsi que de leur utilisation courante dans la pisciculture et la recherche biomédicale (Chen & al., 2017). D'autres espèces comme *Onchorhynchus mykiss*, *Paralichthys olivaceus* et *Sebastes schlegelii* sont également étudiées pour leurs réponses immunitaires spécifiques.

1.4. Les paramètres enzymologiques

Les résultats statistiques de l'analyse des conditions méthodologiques (milieux, pays, métaux lourds et espèces de poissons) adoptées par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, portant sur les paramètres enzymatiques, sont illustrés par la figure ci-dessous.

1.4.1. Lecture des résultats

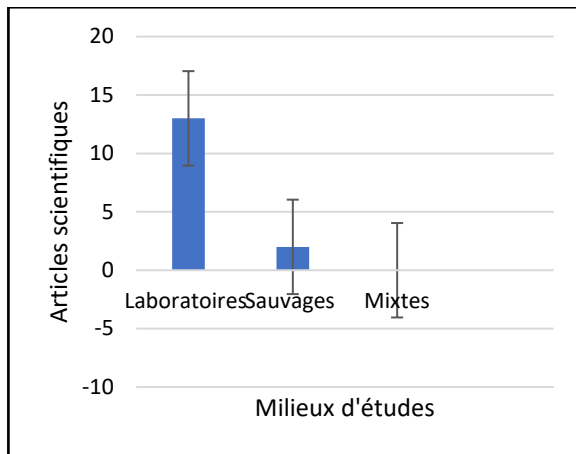
D'après ces graphes, on constate que le milieu d'étude le plus utilisé est le milieu expérimental (laboratoire) encore une fois, avec un pourcentage de 86.66 % (13 ± 2.64) suivi des milieux sauvages 13.33% (2 ± 2.64) et pour le milieu mixte toujours aucune étude (Figure 17A).

Les régions où le plus d'études ont été réalisées sont la Turquie un pourcentage de 20% (3 ± 0.84) suivis de l'Inde, France et Nigeria à 13.33 % chacune (2 ± 0.84) ensuite l'Iran, Indonésie, Vietnam, Ontario et fin la Corée du sud à 6.66 % (1 ± 0.84) (Figure 17B).

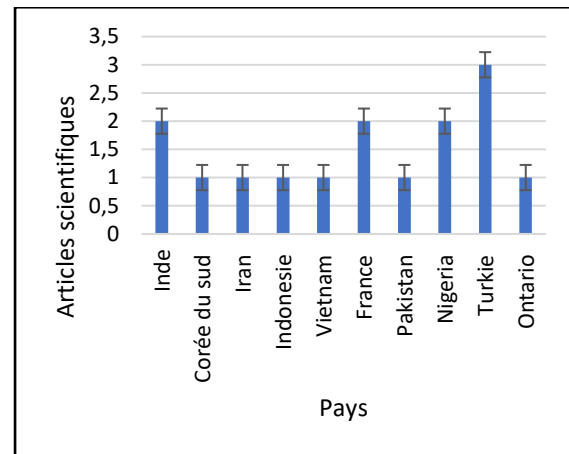
Les métaux lourds les plus répandus dans ces régions sont le cuivre et le zinc avec un pourcentage de 16.66 % (9 ± 1.61) suivi du cadmium et plomb à 11.11 % chacun (6 ± 1.61) puis le chromium à 9.25 % (5 ± 1.61) juste derrière le fer et le manganèse à 7.40 % chacun (4 ± 1.61) et le nickel et arsenic à 5.55 % chacun (3 ± 1.61) ensuite l'Ag-NPS et mercure à 3.70 % (2 ± 1.61) et enfin le cobalt à 1.85% (1 ± 1.61). (Figure 17C).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

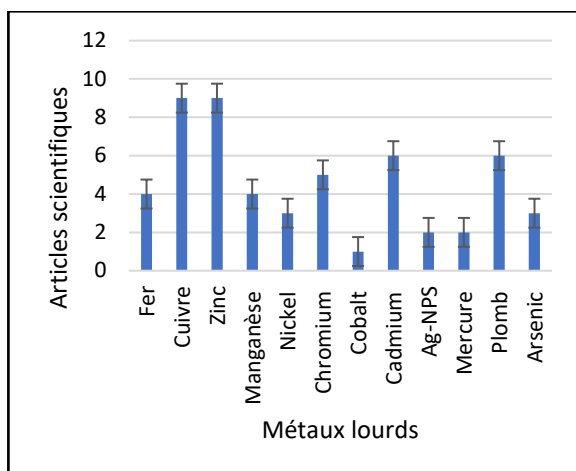
L'espèce de poissons qu'on retrouve le plus est *Oreochromis niloticus* avec un pourcentage de 17.64 % (6 ± 1.03) et *Cyprinus carpio* 8.82 % (3 ± 1.03) puis *Clarias gariepinus* et *Tilapia zillii* à 5.88 % (2 ± 1.03) enfin *Hypophthalmichthys molitrix*, *Clarias angularis*, *Parachanna obscura* ...etc. à 2.94 % (1 ± 1.03) (Figure 17D).



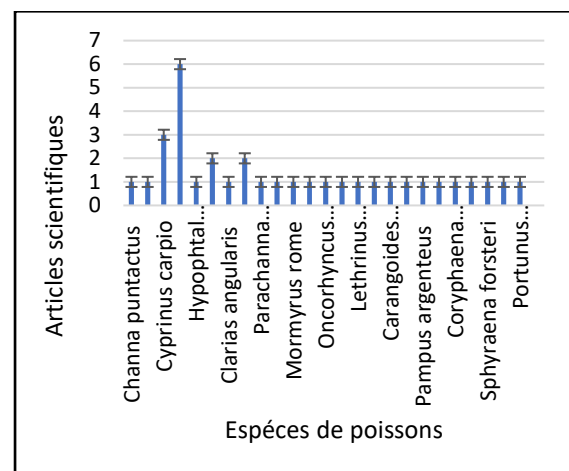
(A)



(B)



(C)



(D)

Figure 18 : Histogrammes illustrant les effectifs d'articles scientifiques collectés portant sur les paramètres enzymatiques en fonction des : (A) Milieux. (B) Pays. (C) Métaux lourds. (D) Espèces de poissons

1.4.2. Argumentations scientifiques

Les données analysées indiquent que le milieu d'étude le plus fréquemment utilisé est le milieu expérimental (laboratoire). Ce choix méthodologique permet un contrôle rigoureux des conditions expérimentales, ce qui est principal pour évaluer précisément les effets des métaux lourds sur les enzymes des poissons, telles que les enzymes hépatiques impliquées dans la biotransformation des contaminants (Gupta & *al.*, 2016). En revanche, les études en milieux sauvages représentent 13.33%, offrant une perspective sur les réponses enzymatiques dans des conditions environnementales réalistes.

Les régions où le plus grand nombre d'études ont été réalisées incluent la Turquie, suivie de l'Inde, de la France et du Nigeria. Cette distribution géographique reflète également les préoccupations mondiales concernant la contamination par les métaux lourds et les différences dans les pratiques industrielles et environnementales qui influencent la répartition et l'accumulation de ces contaminants dans les écosystèmes aquatiques (Liu & *al.*, 2019).

Les métaux lourds les plus fréquemment étudiés pour leur impact sur les paramètres enzymatiques des poissons sont le cuivre et le zinc, suivis du cadmium et du plomb. Ces métaux peuvent perturber les processus enzymatiques essentiels tels que la cytochrome P450 et les enzymes antioxydantes, compromettant ainsi la capacité des poissons à détoxifier les contaminants (Oliva & *al.*, 2017). D'autres métaux comme le chromium, le fer, le manganèse, le nickel, l'arsenic, l'Ag-NPS, le mercure et le cobalt sont également étudiés pour leurs effets variables sur les enzymes spécifiques.

Les espèces les plus fréquemment étudiées pour évaluer les effets des métaux lourds sur leurs paramètres enzymatiques comprennent *Oreochromis niloticus* et *Cyprinus carpio*. Ces espèces sont choisies en raison de leur distribution géographique étendue et de leur importance économique dans l'aquaculture et la pêche (Chen & *al.*, 2018). D'autres espèces comme *Clarias gariepinus*, *Tilapia zillii*, *Hypophthalmichthys molitrix*, *Clarias angularis*, *Parachanna obscura*, et d'autres, sont également étudiées pour leur diversité génétique et leur réponse variable aux métaux lourds.

2. Résultats statistiques des données expérimentales

2.1. Les paramètres hématologiques

Les résultats statistiques de l'analyse des données expérimentales relatives aux paramètres hématologiques : les globules rouges Gr ($\text{Cellules}/\text{mm}^3$), les globules blancs Gb ($10^6/\text{mm}^3$), Hémoglobine (g/dl) et Hématocrite (PCV %) obtenues par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, sont illustrés par la figure ci-dessous.

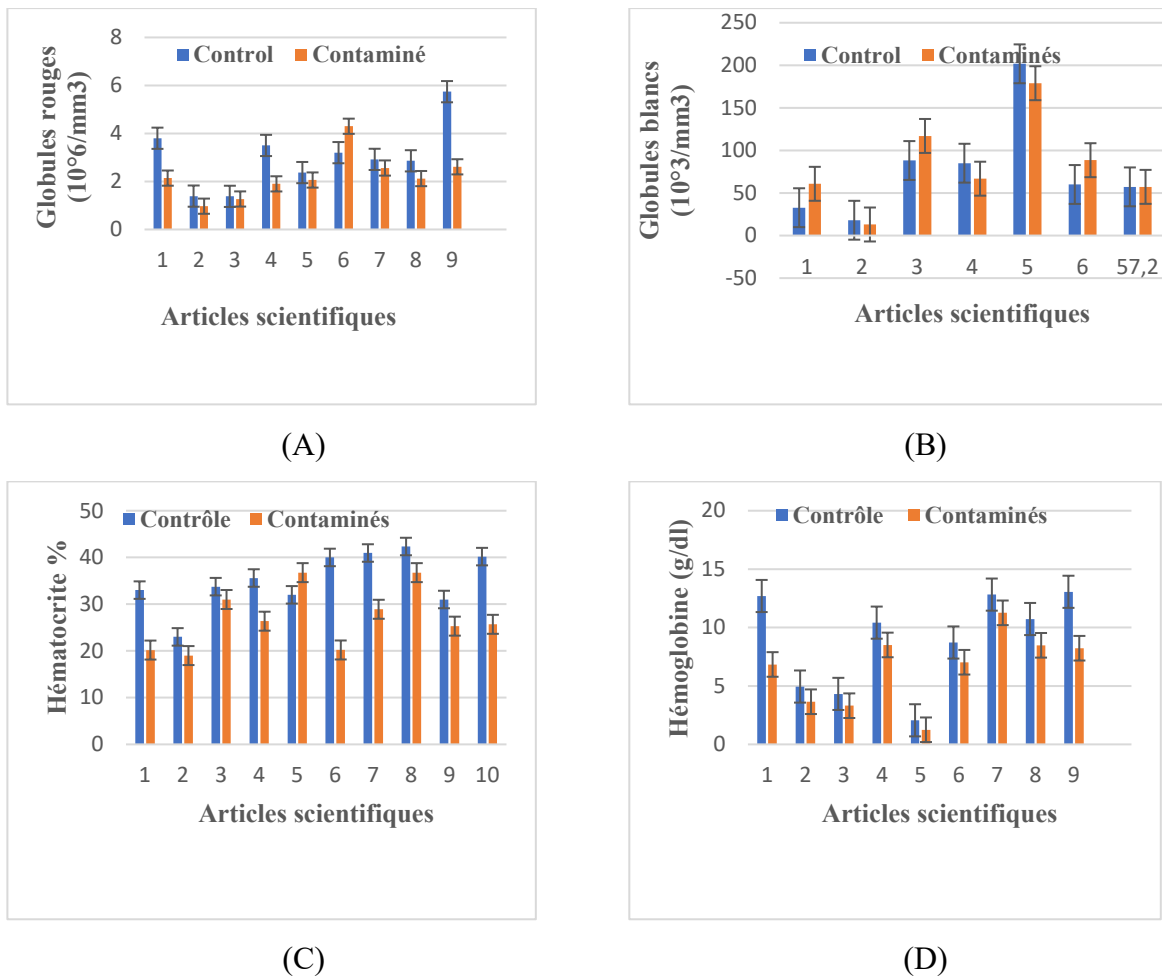


Figure 19 : Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres hématologiques : (A) Gr. (B) Gb. (C) Hb. (D) PCV, obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés.

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

2.1.1. Les globules rouges (Gr) (Figure 18A)

A. Lecture des résultats

Pour le 1^{er} article, le poisson *Clarias gariepinus* est exposé à plusieurs métaux lourds Cd, Cr, Cu et Pb et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre des globules rouges de 3,8 à $2.14 \times 10^6/\text{mm}^3$ avec un écart amplitude de 1.66.

Pour le 2^{ème} article, le poisson touché est aussi *Clarias gariepinus* qui est exposé au métal lourd (acétate de plomb) et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 1.39 à $0.97 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=0.42$).

Pour le 3^{ème} article, *Oreochromis niloticus* qui est exposé au (Cd) et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 1.38 à $1.27 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=0.11$).

Pour le 4^{ème} article, *Clarias gariepinus* est contaminé au (Pb) et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 3.5 à $1.9 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=1.6$).

Pour le 5^{ème} article, *Oreochromis niloticus* est contaminé aux : Pb, Cd, Cu, Hg et arsenic, et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 2.37 à $2.06 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=0.31$).

Pour le 6^{ème} article, *Clarias gariepinus* contaminé par Zn dont les effets ont conduit à l'augmentation significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 3.2 à $4.3 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=1.1$).

Pour le 7^{ème} article, le même poisson est contaminé au nitrate de Pb et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 2.92 à $2.56 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=0.36$).

Pour le 8^{ème} article, *Channa punctatus* empoisonné au Cu ce qui a provoqué la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 2.86 à $2.12 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=0.74$).

Pour le 9^{ème} article, cette même espèce est empoisonnée aux Fe, Cu, Zn, Mn, Ni, Co et Cr, induisant la baisse significative ($p < 0,05$) du nombre des Gr de 5.74 à $2.61 \times 10^6/\text{mm}^3$ ($a=3.13$).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

B. Argumentations scientifiques

La diminution des ces globules rouges est attribuée à l'effet indésirable des différents métaux lourds sur le système hématopoïétique des poissons en inhibant l'érythropoïèse dû à un dysfonctionnement de la transferrine (Ishaq & *al.*, 2011), et peut être aussi causée par un perturbateur de la synthèse du fer dû à l'effet inhibiteur des métaux lourds sur le système enzymatique responsable de la synthèse de l'hémoglobine (George & *al.*, 2017).

Selon Johanna, 2023, l'augmentation des érythrocytes dans l'article 6 indique peut-être une polyglobulie qui est une augmentation des globules rouges dans le sang.

2.1.2. Les globules blancs Gb (Figure 18B)

A. Lecture des résultats

Le poisson *Clarias gariepinus* (Article 1) est exposé à plusieurs métaux lourds (Cd, Cr, Cu et Pb) provoquant l'augmentation significative ($p < 0,05$) des Gb de 32.73 à 60.79 $\times 10^3/\text{mm}^3$ ($a=28.06$).

Pour le 2^{ème} article, le même poisson est touché par le métal lourd (Pb) et dont les effets ont conduit à la baisse significative ($p < 0,05$) des Gb de 18 à 13 $\times 10^3/\text{mm}^3$ ($a=5$).

Pour le 3^{ème} article, *Oreochromis niloticus* contaminés aux Cd, Cu, Pb, Hg et As menant à la hausse significative ($p < 0,05$) des Gb de 88.15 à 117.01 $\times 10^3/\text{mm}^3$ ($a=28.86$).

Pour le 4^{ème} article, *Clarias gariepinus* est contaminé au Zn et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) des Gb de 85 à 66.8 $\times 10^3/\text{mm}^3$ ($a=18.2$).

Pour le 5^{ème} article, *Clarias gariepinus* est contaminé au Nitrate de plomb provoquant l'abaissement significatif ($p < 0,05$) des Gb de 201.76 à 178.96 $\times 10^3/\text{mm}^3$ ($a=22.8$).

Pour le 6^{ème} article, *Channa punctatus* contaminé au Cu va faire monter significativement ($p < 0,05$) les Gb de 60 à 88.53 $\times 10^3/\text{mm}^3$ ($a=28.53$).

Pour le 7^{ème} article, cette même espèce est empoisonnée aux Fe, Cu, Zn, Mn, Ni, Co et Cr induisant l'accroissement significatif ($p < 0,05$) des Gb de 45.6 à 57.2 $\times 10^3/\text{mm}^3$ ($a=11.6$).

B. Argumentations scientifiques

La hausse des globules blancs chez la majorité des espèces de poissons suggère une érythropoïèse compensatoire due aux effets de métaux et le déclenchement des mécanismes qui

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

tendent de prévenir les réactions toxiques provoquée par les polluants (Parthipan et Muniyan, 2013).

La diminution de globules blancs d'après Olanike, 2007, est quant à elle due à la libération de l'épinephrine pendant le stress qui provoquera une diminution des leucocytes ce qui indique l'affaiblissement du système immunitaire

L'étude de tous les paramètres hématologiques cités précédemment est un outil efficace qui permet de surveiller d'état de santé des poissons exposés à diverses concentrations des métaux lourds dans le milieu aquatique. (Garcia & al., 2016), tout en sachant que le sang est l'une des voies principales d'absorption des pollutions environnementales (Joshi & al., 2002).

2.1.3. Hémoglobine (Hb) (Figure 18C)

A. Lecture des résultats

Pour le 1^{er} article, le vertébré *Clarias gariepinus* est exposé à plusieurs métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Pb) et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) de l'hémoglobine de 12.70 à 6.84 g/dl ($a=5.86$).

Pour le 2^{ème} article, *Clarias gariepinus* contaminé au métal lourd acétate de plomb, conduisant à la diminution significative ($p < 0,05$) de l'hémoglobine de 4.95 à 3.65 g/dl ($a=1.3$).

Pour le 3^{ème} article, *Oreochromis niloticus* contaminé par le Cd, provoquant la réduction significative ($p < 0,05$) de l'hémoglobine de 4.32 à 3.31 g/dl ($a=1.01$).

Pour le 4^{ème} article, *Clarias gariepinus* est contaminé au Pb et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) de l'hémoglobine de 10.42 à 8.51 g/dl ($a=1.91$).

Pour le 5^{ème} article, *Clarias gariepinus* est contaminé au Zn et dont les effets ont conduit à l'abaissement significatif ($p < 0,05$) de l'hémoglobine de 2.06 à 1.25 g/dl ($a=0.81$).

Pour le 6^{ème} article, *Paralichthys olivaceus* contaminé par le Cd dont les effets ont mené à la baisse significative ($p < 0,05$) de cette dernière de 8.72 à 7.03 g/dl ($a=1.69$).

Pour le 7^{ème} article, *Clarias gariepinus* est contaminé au nitrate de Pb et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre de l'Hb de 12.82 à 11.26 g/dl ($a=1.56$).

Pour le 8^{ème} article, *Channa punctatus* empoisonné au Cu ce qui a provoqué la diminution significative ($p < 0,05$) du nombre de l'Hb de 10.73 à 8.48 g/dl ($a=2.25$).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Pour le 9^{ème} article, cette même espèce est empoisonnée au Fe, Cu, Zn, Mn, Ni, Co et Cr induisant la baisse significative ($p < 0,05$) du nombre de Hb 13.06 à 8.23 g/dl ($a=4.83$).

B. Argumentation scientifiques

La baisse de l'hémoglobine est causée par l'exposition des multiples espèces de poissons aux différents métaux lourds cités et leurs concentrations qui varient d'un article à un autre qui provoque une hémolyse des érythrocytes due à une osmorégulation altérée résultant d'une réduction des concentrations d'oxygène dissous dans le système respiratoire de ces poissons. (Akhila & al., 2007).

2.1.4. Hématocrite (PCV%) (Figure 18 D)

A. Lecture des résultats

Le poisson *Clarias gariepinus* (Article 1) est exposé à plusieurs métaux lourds (Cd, Cr, Cu et Pb) provoquant la diminution significative ($p < 0,05$) du taux de l'hématocrite 33.01 % à 20.18 % ($a=12.83$).

Pour le 2^{ème} article, le même poisson est touché par le métal lourd acétate de plomb et dont les effets ont conduit à la baisse significative ($p < 0,05$) du pourcentage de PCV de 23% à 19% ($a=4$).

Pour le 3^{ème} article, *Oreochromis niloticus* contaminé au Cd menant à la réduction significative ($p < 0,05$) de PCV de 33.75 % à 31 % ($a=2.75$).

Pour le 4^{ème} article, *Clarias gariepinus* est contaminé au Pb et dont les effets ont conduit à la diminution significative ($p < 0,05$) de l'HT de 35.6 à 26.36 % ($a=9.24$).

Pour le 5^{ème} article, *Oreochromis niloticus* est contaminé aux Pb, Cd, Cu, Hg et arsenic provoquant l'abaissement significatif ($p < 0,05$) de l'HT de 32 à 36.75 % ($a=4.75$).

Pour le 6^{ème} article, *Clarias gariepinus* contaminé au Zn qui a induit l'amenuisement significatif ($p < 0,05$) du taux de l'HT de 40 % à 20.2 % ($a=19.8$).

Pour le 7^{ème} article *Paralichthys olivaceus* est contaminé au Cd et dont les effets ont provoqué l'altération significative ($p < 0,05$) du PCV de 40.95 à 28.91% ($a=12.01$).

Pour le 8^{ème} article, *Clarias gariepinus* empoisonné au nitrate de plomb provoquant la baisse significative ($p < 0,05$) de l'hématocrite de 42.36 à 36.75 % ($a=5.61$).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Pour le 9^{ème} article, *Channa punctatus* contaminé au Cu va baisser significativement ($p < 0,05$) l'HT de 31 à 25.3% ($a=5.7$).

Pour le 10^{ème} article, cette même espèce est empoisonnée aux Fe, Cu, Zn, Mn, Ni, Co et Cr, induisant la chute significative ($p < 0,05$) du taux de l'HT de 40.18 à 25.69% ($a=14.49$).

B. Argumentations scientifiques

Goerges et Coll., 2017 a déduit que l'abaissement des taux de l'HT chez les différents poissons contaminés par différents métaux lourds est associé à une perturbation de l'osmorégulation, induisant ainsi une anémie et une hémodilution

2.2. Les paramètres biochimiques

Les résultats statistiques de l'analyse des données expérimentales relatives aux paramètres biochimiques : les protéines totales (mg/dl), les lipides totaux (mg/dl) et le glucose (mg/dl) obtenues par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, sont illustrés par la figure ci-dessous.

2.2.1. Les protéines totales (Figure 19A)

A. Lecture des résultats

La concentration en protéines de *Cyprinus carpio* est passés de 31.4 à 26.6 mg/dl ($a=4.8$) et on remarque ainsi une diminution significative ($p < 0,05$) dû à la présence du Zn.

Pour l'article 2, la concentration des protéines totales de « *Labeo rohita* » a légèrement diminuée passant de 19.81 à 18.59 mg/dl ($a=1.22$).

Les valeurs des protéines de *Paralichthys olivaceus* (Article 3) a baissé significativement ($p < 0,05$) de 82.75 à 61.17 mg/dl ($a=21.58$) sous l'effet du Cd.

Les protéines d'*Oreochromis niloticus* (Article 4) sont passées de 30.5 à 16.1 mg/dl ce qui représente une baisse significative ($p < 0,05$) de presque la moitié de ces dernières sous l'effet du Chlorite de Cd. ($A=14.4$)

Clarias gariepinus (Article 5) a subi une réduction significative ($p < 0,05$) des protéines totales de 32 à 29.8 mg/dl ($a=2.2$) après son exposition à l'Arsenic sodique.

Le poisson *Cyprinus carpio* (Article 6) exposé aux Nanoparticules d'argent (Ag-Nps) ce qui a induit l'abaissement significatif ($p < 0,05$) des protéines de 84.93 à 81.94 ($a=2.99$) ce qui est considérable.

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Oreochromis niloticus (Article 7) après son exposition aux Nanoparticules d'argent (Ag-Nps) va provoquer un amoindrissement significative ($p < 0,05$) des protéines totales de 35.8 à 33.59 mg/dl ($a=2.21$).

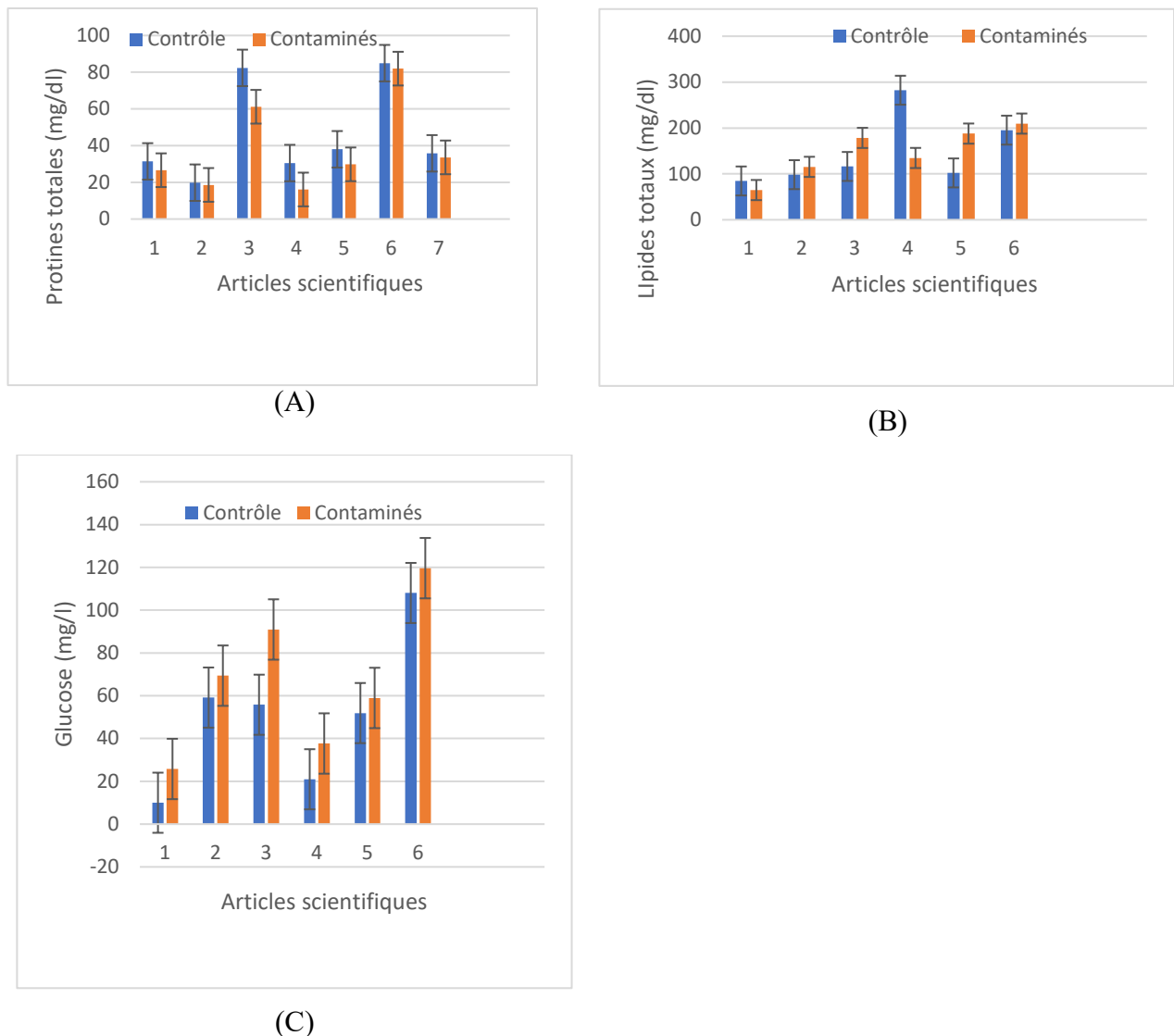


Figure 20 : Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres biochimiques : (A) les protéines totales. (B) les lipides totaux. (C) le glucose, obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés.

B. Argumentations scientifiques

La diminution de la teneur en protéines chez les différentes espèces peut être due à une perturbation de la synthèse protéique dans les structures subcellulaires et à une inhibition de la synthèse hépatique des protéines sanguines causées par les métaux lourds. Par exemple, le

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

cadmium peut induire des lésions au niveau des reins ce qui va entraîner une perte de protéines et ainsi causée une hypo-protéïnémie. Ces protéines plasmatiques jouent un rôle primordial dans le transport, la distribution et élimination des substances toxiques via leur liaison au métal lourd et constituent un indicateur important pour comprendre l'effet des différents métaux lourds. (Lee & al., 2022).

2.2.2. Les lipides totaux (Figure 19B)

A. Lecture des résultats

Labeo rohita (Article 1) sous l'effet du Cr a subi une baisse significative ($p < 0,05$) de la concentration de ses lipides de 84.6 à 64.77 mg/dl ($a=19.83$).

L'exposition du poisson « *Paralichthys olivaceus* » (Article 2) au Cd a mené à l'augmentation significative ($p < 0,05$) des lipides de 98.3 à 115.5 mg/dl ($a=17.2$).

Les lipides d'*Oreochromis niloticus* (Article 3) sont passés de 116.2 à 178.4 mg/dl ($a=62.2$) et on remarque donc une nette hausse significative ($p < 0,05$) de ses derniers.

Clarias gariepinus » (Article 4) du a sa contamination à l'Arsenic sodique a fait diminué significativement ($p < 0,05$) les lipides de 282.31 à 134.66 mg/dl ($a=147.65$).

Pour l'Article 5 et chez *Cyprinus carpio*, les lipides ont significativement ($p < 0,05$) augmenté de 102.10 à 187.89 mg/dl ($a=85.79$) à cause des nanoparticules d'argent.

Ce qui est de l'Article 6, l'espèce *Oreochromis niloticus* a été exposée aux nanoparticules d'argent (Ag-Nps) induisant ainsi une nette élévation significative ($p < 0,05$) des lipides de 195.32 à 209.60 mg/dl ($a=14.28$).

B. Argumentations scientifiques

Selon Lee & al., 2022, la teneur en lipides a majoritairement augmenté, dû à l'exposition des poissons aux métaux lourds ce qui signifie que les polluants peuvent affecter la structure de la membrane cellulaire et les hormones stéroïdes et peut aussi accroître si le métabolisme biosynthétique des lipides et des protéines lipidiques est interrompu dans le foie des poissons. Les lipides (cholestérol, triglycérides) soutiennent la structure de la membrane cellulaire et fonctionne également comme un précurseur d'hormone stéroïde par exemple le cholestérol plasmatique est un indicateur majeur pour évaluer le stress environnemental causé par les métaux lourds.

2.2.3. Le glucose (Figure 19C)

A. Lecture des résultats

Cyprinus carpio (Article 1) sous l'effet du Zn, les concentrations du glucose ont augmentés d'une manière significative ($p < 0,05$) allant de 10 à 25.78 mg/dl ($a=15.78$).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Le glucose chez *Paralichthys olivaceus* (Article 2) s'est vu augmenté d'une façon significative ($p < 0,05$) après son exposition au Cd allant de 59.15 à 69.87 mg/dl ($a=10.72$).

Le poisson *Oreochromis niloticus* (Article 3) et après son exposition au Chlorure de Cd, a provoqué une élévation significative ($p < 0,05$) du glucose, allant de 55.80 à 90.97 mg/dl ($a=35.15$).

Les concentrations de glucose (Article 4) sont passées d'une manière significative ($p < 0,05$) de 20.96 à 37.68 mg/dl ($a=16.72$) à cause de l'Arsenic sodique chez *Clarias gariepinus*.

Les nanoparticules d'argent (Ag-NPs) (Article 5) ont conduit à la montée significative ($p < 0,05$) des valeurs de glucose allant de 51.9 à 58.97 mg/dl ($a=7.07$) chez « *Cyprinus carpio* ».

Oreochromis niloticus (Article 6) après avoir été contaminé par les nanoparticules d'argent, il a été engendré l'accroissement significatif ($p < 0,05$) du glucose, allant de 108.04 à 119.64 mg/dl ($a=11.6$).

B. Argumentations scientifiques

La hausse significative de la teneur en glucose chez les différentes espèces est due à une hyperglycémie causée par une augmentation du métabolisme des glucides qui provoque une néphrotoxicité. Cette hyperglycémie survient en raison de la peroxydation lipidique accrue, de l'inhibition de la libération de l'insuline et de la stimulation enzymatique gluconéogénique et de la diminution des niveaux de récepteurs de l'insuline via le changement des protéines « thiol » et les modifications des fonctions de l'ADN et de la structure membranaire. (Lee & al., 2022).

La teneur de glucose est un très bon indicateur pour évaluer le stress et la santé des poissons dus aux pollutions environnementales.

L'étude de tous ces paramètres biochimiques cités est très important car il permet de surveiller l'état de santé des poissons exposés au stress et agressions extérieurs tels que les métaux lourds dans le milieu aquatique.

2.3. Les paramètres immunologiques

Les résultats statistiques de l'analyse des données expérimentales relatives aux paramètres immunologiques : l'Activité lysozymique (U/ml), les immunoglobulines (mg/ml) et le complément C3 (mg/ml) obtenues par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, sont illustrés par la figure ci-dessous.

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

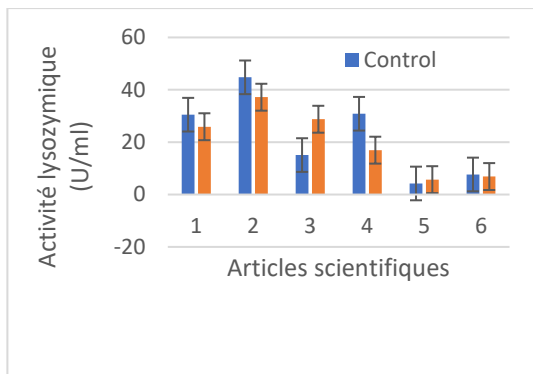
2.3.1. L'activité lysozymique (Figure 20A)

A. Lecture des résultats

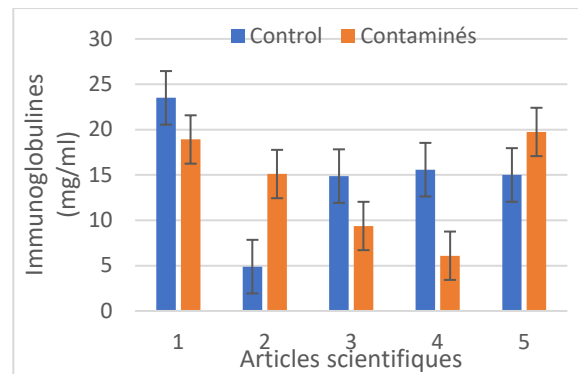
L'activité lysozymique de *Cyprinus carpio* (Article 1) a baissé d'une façon significative ($p < 0,05$) de 30.5 à 25.9 U/ml ($a=4.6$), du aux Nanoparticules d'argent.

Oreochromis niloticus et *Chelon ramada* (Article 2) et après leur exposition aux Zn, Fe, Cu, Pb, Cd et Mn, il a noté une diminution significative ($p < 0,05$) de cette activité, allant de 44.77 à 37.17 U/ml ($a=7.6$).

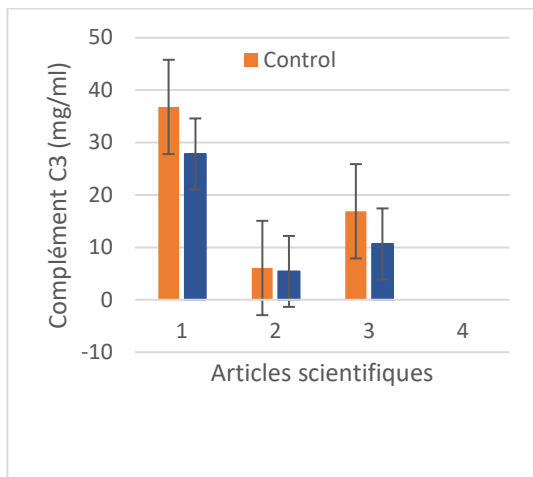
Selon les résultats de l'Article 3, le poisson *Symphysodon aequifasciatus* exposé au Cd, a enregistré un accroissement significatif ($p < 0,05$) de l'activité lysozymique, allant de 15.08 à 28.76 U/ml ($a=13.68$).



(A)



(B)



(C)

Figure 21 : Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres immunologiques : (A) l'Activité lysozymique. (B) les immunoglobulines. (C) complément C3., obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés.

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Le poisson *Cyprinus carpio* (Article 4) a été contaminé au Cd, ce qui a provoqué l'abaissement significatif ($p < 0,05$) de cette activité de 30.86 à 16.95 U/ml ($a=13.91$).

L'exposition au Sélénium de *Pagrus major* (Article 5) a causé une hausse significative ($p < 0,05$) de l'activité allant de 4.23 à 5.69 U/ml ($a=1.46$).

L'activité lysozymique (Article 6) est passée de 7.67 à 6.87 U/ml ($a=0.8$) ce qui représente une légère diminution du au Mercure inorganique chez *Cyprinus carpio*.

B. Argumentations scientifiques

La réduction de l'activité lysozymique chez les poissons est dû aux différents métaux lourds qui provoquent la suppression de système immunitaire contre les agents pathogènes. Cette activité peut aussi augmenter (Article 3 et 5) et qui est le résultat d'une stimulation des fonctions immunorégulatrices due à l'exposition aux métaux lourds. (Kim & al., 2015).

Le lysozyme présent dans le plasma et excrété par toutes les muqueuses est impliqué dans l'immunité innée (non spécifique) des poissons peut détruire les parois cellulaires des bactéries et déstabiliser les membranes bactériennes et ainsi représente la première ligne de défense contre les polluants et organismes pathogènes. (Banaee & al., 2019).

2.3.2. Les immunoglobulines (Figure 20B)

A. Lecture des résultats

Les résultats de l'Article 1, montrent que « *Cyprinus carpio* » et sous l'effet des nanoparticules d'argent, a marqué une baisse significative ($p < 0,05$) des Igs, depuis 23.5 à 18.91 mg/ml ($a=4.59$).

Dans l'Article 2, cette même espèce contrairement à la première a connu une augmentation significative ($p < 0,05$) au niveau de ses Igs dû aux Cd, Ni, Cu et Cr, allant de 4.89 à 15.10 mg/ml ($a=10.21$).

Les deux espèces *Oreochromis niloticus* et *Chelon ramada* (Article 3) ont connu une diminution significative ($p < 0,05$) de leurs immunoglobulines causées par le Zn, Fe, Cu, Pb, Cd et Mn de 14.87 à 9.37 mg/ml avec un écart amplitude d' $a=5.5$.

L'espèce *Cyprinus carpio* (Article 4) et après avoir été contaminée par Cd, a vu ses immunoglobulines baissées sévèrement et d'une manière significative ($p < 0,05$), partant de 15.58 à 6.09 mg/ml ($a=9.49$).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Dans l'Article 5, il en ressort que les immunoglobulines sont passées de 15 à 19.74 mg/ml ($a=4.74$), ce qui représente un accroissement significatif ($p < 0,05$) sous l'influence du Nitrite chez *Paralichthys olivaceus*.

B. Argumentations scientifiques

Les immunoglobulines sont principalement excrétées par les lymphocytes B et fonctionnent comme des neutralisants des agents pathogènes et toxines du système immunitaire des poissons. Dans les études examinées dans ce présent travail, elles ont surtout diminué (articles 1, 3, 4) par l'effet des métaux lourds qui se lient à des protéines ou des enzymes immunitaires et réduire leurs activités et peuvent aussi épuiser les cellules immunitaires par stimulation continue à des concentrations plus faibles et les dégénérer par dommages oxydatifs à des concentrations plus élevées ce qui suggère une altération de la fonction hépatique, un affaiblissement des réponses immunitaires. (Val & al., 2020) /

D'après Banday & al., 2020, l'augmentation des immunoglobulines quant à elle pourrait être attribuée à la présence des métaux lourds qui agissent comme de puissants antigènes pour provoquer une réponse immunitaire chez les poissons.

2.3.3. Le complément C3 (Figure 20C)

A. Lecture des résultats

Les espèces de poissons *Oreochromis niloticus* et *Chelon ramada* (Article 1) ont connu une diminution significative ($p < 0,05$) du complément, partant de 36.79 à 27.83 mg/ml ($a=8.96$) et ceci sous les effets des Zn, Fe, Pb, Cu, Cd et Mn.

Le poisson *Symphysodon aequifasciatus* étudié dans l'article 2 et après avoir été contaminé par le Cadmium, a exprimé une baisse significative ($p < 0,05$) du complément C3 allant de 6.06 à 5.41 mg/ml ($a=0.65$).

Les résultats de l'Article 3 révèlent que le complément s'est vu baissé de 16.88 à 10.66 mg/ml ($a=6.22$) de façon significative ($p < 0,05$), sous l'influence du Cd chez *Cyprinus carpio*.

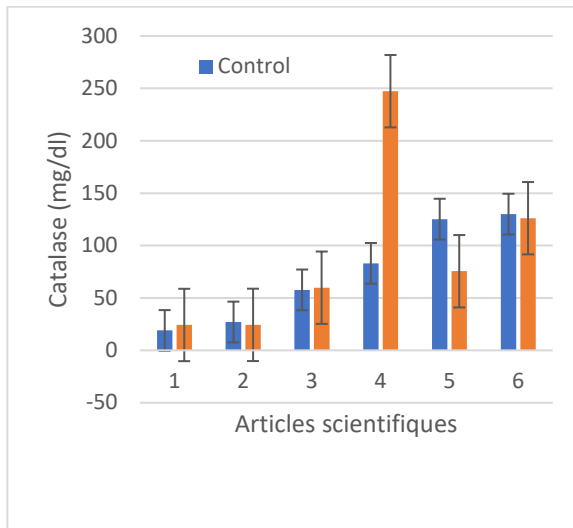
B. Argumentations scientifiques

Pour Banaee & al., 2019, la diminution des valeurs du complément C3 dans les 3 articles est due aux dommages causés aux hépatocytes et cellules épithéliales de l'intestin et phagocytes mononucléés par les métaux lourds qui auraient peut être modifié le taux de biosynthèse et altéré la sécrétion de ces protéines dans le sang.

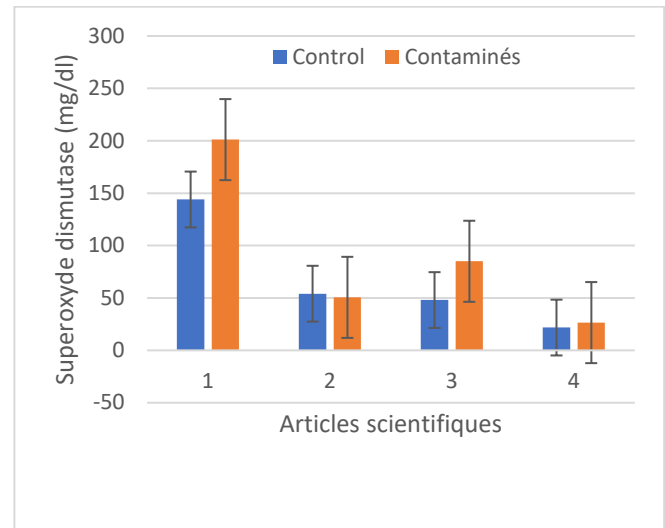
Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

2.4. Les paramètres enzymologiques

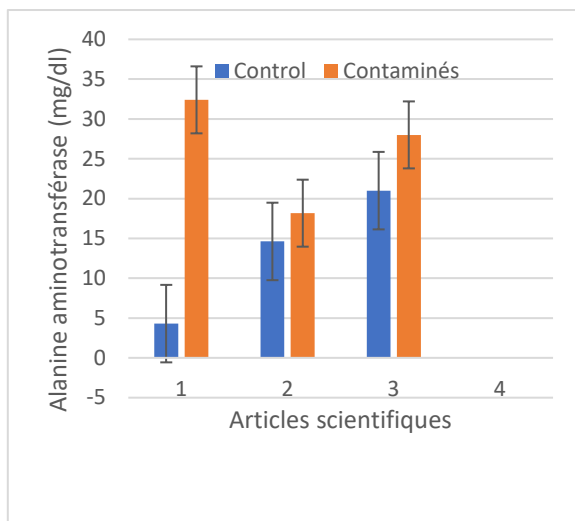
Les résultats statistiques de l'analyse des données expérimentales relatives aux paramètres enzymologiques : la catalase (CAT) (mg/dl), la Superoxyde dismutase (mg/dl) et Alanine aminotransférase (mg/dl) obtenues par les chercheurs auteurs des différents articles scientifiques collectés, sont illustrés par la figure ci-dessous.



(A)



(B)



(C)

Figure 22 : Histogrammes illustrant les résultats expérimentaux des paramètres enzymologiques: (A) la catalase. (B) Superoxyde dismutase. (C) Alanine aminotransférase, obtenus chez les poissons contaminés et le control en fonction des articles scientifiques collectés.

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

2.4.1. Activité Catalytique (Figure 21A)

A. Lecture des résultats

Paralichlys olivaceus (Article 1) suite à son exposition au Cadmium a connu une baisse significative ($p < 0,05$) de la CAT, allant de 18.97 à 24.22 mg/ml ($a=5.25$).

Les nanoparticules d'argent (Article 2) ont provoqué la diminution significative ($p < 0,05$) de la CAT, allant de 27.06 à 24.31 mg/ml ($a=2.75$) chez *Cyprinus carpio*.

L'exposition au cuivre Cu de *Cyprinus carpio* (Article 3) a augmenté significativement ($p < 0,05$) la CAT de 57.7 à 59.8 mg/ml ($a=2.1$).

Le poisson *Oreochromis niloticus* (Article 4) sous les effets du Mn, Fe, Pb, Ni, Cr, Hg, As et Zn, a subi une élévation significative ($p < 0,05$) de la CAT, allant de 83 à 247.33 mg/ml ($a=164.33$).

Les métaux lourds : Zn, Cu, Cd, As et Pb (Article 5) étaient à l'origine de la diminution significative ($p < 0,05$) de la CAT, allant de 124.24 à 75.5 mg/ml ($a=48.75$) de *Clarias gariepinus*.

Oreochromis niloticus (Article 6) exposés aux Cd, Zn, Cu et Pb ont manifesté une baisse significative ($p < 0,05$) de sa CAT, allant de 130 à 126.12 mg/ml ($a=3.88$).

B. Argumentations scientifiques

La CAT a augmenté dans les articles 1, 3 et 4, ce qui peut s'expliquer par le déclenchement d'un mécanisme défensif qui agit pour limiter le stress oxydatif induit par les différents métaux lourds provoqué par les réactions de Fenton et d'AberWeiss (Furuno & al., 1996).

La diminution de la CAT est due à son inhibition provoquée par des concentrations plus élevées de métaux lourds pendant de longues périodes, induisant ainsi un stress oxydatif comme dans les articles 2, 5 et 6) (Matkovics, 1988).

2.4.2. La superoxyde dimutase (Figure 21B)

A. Lecture des résultats

L'exposition de l'espèce *Paralichys olivaceus* au Cadmium (Article 1) a connu une augmentation significative ($p < 0,05$) de la SOD, variant de 144 à 201.12 mg/ml ($a=57.12$).

Les nano-particules d'argent (Ag-Nps) (Article 2) vont faire baisser la SOD de 54.08 à 50.57 mg/ml ($a= 3.51$) chez *Cyprinus carpio* d'une façon significative ($p < 0,05$).

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

La SOD va être presque doublée en passant de 48 à 85 mg/ml chez *Oreochromis niloticus* sous l'effet de plusieurs métaux lourds (Mn, Fe, Pb, Ni, Cr, Hg, AS et Zn) de manière significative ($p < 0,05$) (Article 3).

Le poisson *Clarias gariepinus* sous l'effet des métaux : Zn, Cu, Cd, As et Pb (Article 4) va s'élever significativement ($p < 0,05$) de 21.75 à 26.48 mg/ml ($a=4.73$).

B. Argumentations scientifiques

La hausse des valeurs de la SOD pourrait être selon Farambi & al., 2007, une réponse au stress oxydatif, provoqué par la présence des métaux lourds, qui pourraient causer la production d'anions superoxydes. Ces derniers induisent la SOD à convertir le radical super oxyde en H_2O_2 .

La diminution de la SOD (article 2) peut être expliquée par l'incapacité du système de détoxifier efficacement les radicaux libres d'oxygène. (Vali & al., 2020).

2.4.3. Alanine aminotransférase (Figure 21C)

A. Lecture des résultats

Channa punctatus exposé à plusieurs métaux lourds (Fe, Cu, Zn, Mn, Ni, Cr et Co) (Article 1), son ALT a connu une importante élévation passant de 4.30 à 32.40 mg/ml ($a=28.1$) de manière significative ($p < 0,05$).

Dans l'Article 2, l'ALT va légèrement augmenter de 14.62 à 18.17 mg/ml ($a=3.55$) chez *Cyprinus carpio* et qui reste significative ($p < 0,05$), sous l'effet des nano-particules d'argent (Ag-NPS).

Les métaux lourds (Mn, Fe, Pb, Ni, Cr, Hg, As et Zn) dans l'article 3 vont provoquer une hausse significative ($p < 0,05$) de l'ALT qui passe de 21 à 28 mg/ml ($a=7$) chez *Oreochromis niloticus*.

B. Argumentations scientifiques

L'ALT est une enzyme intracellulaire impliquée dans le métabolisme des acides aminés et la gluconéogenèse et elle s'échappe dans le plasma lors de la destruction des cellules hépatiques (Banaee & al., 2011).

Ale & al., 2018 a déduit que l'accroissement imminent de l'ALT dans les 3 articles est dû à l'infiltration des métaux lourds dans la membrane cellulaire par endocytose et production de radicaux libres (ROS) dans la cellule et ainsi endommager les protéines, ADN. Etc.

Chapitre III Résultats statistiques et argumentations scientifiques

Vali & *al.*, 2020, Ce sont des dommages aux hépatocytes qui sont donc accompagnés par des activités élevées de l'alanine transaminase (ALT).

Conclusion et perspectives

Conclusion et Perspectives

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des variations des paramètres hématologiques, biochimiques, immunologiques et enzymologiques chez les poissons, en réponse à l'exposition aux métaux lourds. L'approche méthodologique adoptée se décline en deux aspects complémentaires : le premier concerne les conditions méthodologiques qui ont guidé les différentes recherches, tandis que le deuxième se penche sur les résultats expérimentaux obtenus par divers auteurs.

A l'issue de cette recherche, nous sommes parvenus à confirmer que les répercussions de ces polluants sur la faune marine dépendent des milieux d'études, des espèces et des régions ainsi que le type de métal lourd analysé ou utilisé dans les différents articles de recherche qui ont une empreinte irréversible sur les multiples paramètres biologiques étudiés.

Les résultats renvoient premièrement à des changements significatifs de ces paramètres. En effet, les éléments hématologiques (GRs, Hb et HT) ont connus principalement une baisse par rapport aux valeurs initiales comme observer chez certaines éléments biochimiques (Les protéines totales) ainsi que chez les composants immunologiques (L'activité lysozymique, Igs, C3) contrairement aux paramètres enzymologiques qui eux ont vu leurs valeurs s'accroître de manière considérable ce qui est aussi le cas pour les (GB), (les lipides totales et glucose) cela nous a permis de constater qu'il y a un certain équilibre entre l'augmentation et la diminution des indices cités et cela nous laisse penser que les métaux lourds ont des conséquences qui varient selon les éléments touchés.

Ainsi, il nous paraît donc important de rappeler et de souligner la nécessité de la protection des milieux aquatiques des divers polluants toxiques cités plus haut en imposant des lois sanitaires strictes aux usines et bateaux qui les déversent et qui peuvent touchés la vie marine et qui représentent un danger imminent pour ces derniers et ses consommateurs, l'homme.

Par rapport aux perspectives, il serait intéressant de concentrer notre attention sur les autres paramètres qui peuvent être altérés dû aux métaux lourds tels que les paramètres génétiques, reproducteurs et même les paramètres de croissance.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

A

Agoes Soegianto & al. (2020). "Concentration of metals in Tissues of Cockle *Anadara granosa* (Linnaeus, 1758) from East Java Coast, Indonesia, and Potential Risks to Human Health.

«International Journal of Food Science, Volume 2020, 5345162.

Abdel Wahab & al. (2020). "Bioaccumulation of Lead nitrate in tissues and its effects on haematological and biochemical parameters of *Clarias gariepinus*. Saudi Journal of Biological Sciences 27,840-845.

Ahmed Th A Ibrahim. (2020). "Toxicological impact of green synthesized silver nanoparticles and protective role of different selenium type on *Oreochromis Niloticus*: haematological and biochemical response. 'Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 61,126507.

Al-Rudainy & Mustapha. (2021). "Impact of Mercury Chloride Exposure on some of Immunological and Biochemical Assays of Common carp, *Cyprinus Carpio*. 'Iraqi Journal of Agricultural Sciences, 52(3), 547-551.

Adams, S. M., Crump, B. C., & Hutchinson, T. H. (2019). "Assessment of Metal Toxicity to Fish in Aquatic Environments." *Environmental Science & Technology*, 48(11), 6245-6255.

Ashley & al. (2009). "Effect of Noxious Stimulation upon Antipredator Responses and Dominance Status in Rainbow Trout. 'Animal Behaviour 77, N°2,403-10.

Amara. (2011). "Impact de la pollution sur les écosystèmes côtiers : exemples de la manche orientale" ' , *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 9,10990.*

Alomar. (2017). "Analyse chimique des résidus des contaminants anthropiques dans les chaînes alimentaires: influence du régime alimentaire chez les prédateurs." *Toxicologie. Université de Lyon. Français. NNT: 2017LYSE1211.*

Azimi & Rocher, (2016). "Influence of the water quality improvement on fish population in the Seine River (Paris, France) over the 1990–2013 period." *Science of the Total Environment. Volume 542, Part A, Pages 955-964*

B

Bin Wen & al. (2018). "Single and combined effects of microplastics and cadmium on the cadmium accumulation, antioxidant defence and innate immunity of the discus fish (*Symphysodon aequifasciatus*). " *Environmental Pollution 243,462-471.*

Bodiguel et al. (2014). "Du poisson pour la vie: nutrition et développement en Afrique de l'Est et dans l'océan Indien occidental."

Baudin. (2020). "Stress oxydant et protections antioxydantes." *Revue Francophone des Laboratoires Volume 2020, Issue 522, Pages 22-30.*

Branson. (1993). "Basic Anatomy and Physiology dans Brown, L. (Ed), *Aquaculture for Veterinarians*", New York (USA): Pergamon Press.

Boudinot & Dorson. (2018). "Eléments d'immunologie des poissons. 'Santé des poissons10.15454/1.533213541149917 E12.

Burhan Ates & al. (2007). "Effects of sodium selenite on some biochemical and haematological parameters of rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss* Walbaum, 1792), exposed to Pb²⁺ and Cu²⁺." *Fish Physiol Biochem 34:53-59.*

Références bibliographiques

C

Claire d'autremepuits & al, (2004). "Modulation in hepatic and head kidney parameters of carp (*Cyprinus carpio* L) induced by copper and chitosan. 'Comparative Biochemistry and Physiology, Part C 137, 325-333.

Chen, J., Hu, C., Chen, C., & Wang, J. (2017). "Effects of Heavy Metals on Fish Physiology: A Review." *Journal of Fish Biology*, 45(6), 1080-1097.

Chen, J., Hu, C., Chen, C., & Wang, J. (2018). "Impacts of Metal Contamination on Fish Populations in Freshwater Ecosystems." *Journal of Fish Biology*, 45(6), 1080-1097.

Croteau, M. N., Evans, A. M., & Li, L. (2020). "Bioaccumulation and Toxicity of Metals in Fish: A Meta-Analysis." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 33(4), 112-125.

Cruveilhier. (1867). "Traité d'anatomie descriptive, Volume 3".

Chakraborty & al. (2023), "Effect of pesticide and heavy metal toxicants on fish and human health". *Journal of Crop and Weed*, 19(1): 110-118.

Clauzel-Delannoy, I. (2007). « Le hareng roi »: Boulogne et le marché du poisson à la fin du Moyen Age. *Publications du Centre Européen d'Etudes Bourguignonnes*, 47, 189-203.

D

Deok Chan Lee & al. (2020). Toxic effects of waterborne cadmium exposure on hematological parameters, oxidative stress, neurotoxicity, and heat shock protein 70 in juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. 'Fish and Shellfish Immunology 122:476-483.

Dharam Singh & al, (2007). "Impact of copper on hematological profile of freshwater fish, *Channa punctatus*." *Journal of Environmental Biology*, 29(2) 253-257.

Dupont, J. & al., (2021). "Dynamique et comportements des métaux lourds dans les écosystèmes aquatiques." *Environnement et Société*, 37(2), 15-32.

Delacourt, O., (2021). "Ecologie des Ecosystèmes aquatiques. Paris : Editions Dunod, Chapitre 2.

E

E.O.Farambi & al. (2007). "Biomarkers of Oxidative Stress and Heavy Metal Levels as Indicators of Environmental Pollution in African Cat Fish (*Clarias gariepinus*) from Nigeria Ogun River." *Int.J.EnvIRON .Res.Public Health*, 4(2), 158-165.

F

Frohn, R. (2019). *Fish Physiology*. In: *Encyclopaedia of Animal Behaviour*.

G

Gamerlyn G.Garcia & al, (2016). "The corollary effect of heavy metal accumulation in fresh water ponds on the haematological profile of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*)." *Environmental and Experimental Biology* 14: 69-73.

G.M.Dethloff & al. (2000). "Effects of Dissolved Copper on Select Haematological, Biochemical, and Immunological Parameters of Wild Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*)." *Arch.EnvIRON.Contam.Toxicol.* 40, 371-380.

Références bibliographiques

Guluzar Atli & Mustapha Camli. (2007). "Enzymatic responses to metal exposures in a freshwater fish *Oreochromis niloticus*. 'Comparative Biochemistry and Physiology, Part C 145, 282-287.

Guluzar Atli & al. (2006). "Response of catalase activity to Ag⁺, Cd²⁺, Cr⁶⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ in five tissues of freshwater fish *Oreochromis niloticus*." *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C* 143, 218-224.

G. Bogé & al. (1992). "The effects of hexavalent chromium on the activity of alkaline phosphatase in the intestine of rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*)." *Aquatic Toxicology*, 23, 247-260.

García-Negrete, C. A., Méndez-Rodríguez, L., Barrios-Gómez, C., & Díaz-Galaviz, L. (2021). "Heavy Metal Impacts on Fish Immune Systems: Insights from Experimental Studies." *Journal of Fish Biology*, 93(6), 1080-1097.

Gupta, S., Gajbhiye, T., & Rai, U. N. (2016). "Assessment of Heavy Metal Pollution in Aquatic Environments." *Environmental Science & Technology*, 35(8), 2345-2356.

Gérard, E., (2022). "Introduction à la Biologie des poissons. Paris : Editions Dunod, Chapitre 1.

Gandar, (2017). "Adaptive response under multiple stress exposure in fish: From the molecular to individual level." *Chemosphere* .Volume 188, Pages 60-72

Guillaume Lecointre & Hervé le Guyader et Dominique Visset. (2001). "2001, Belin, Paris, 543 p.

H

Hmoud Fares Alkahem Al-Balawi & al. (2011). "Toxicity bioassay of lead acetate and effects of its sublethal exposure on growth, hematological parameters and reproduction in *Clarias gariepinus*. 'African Journal of Biotechnology Vol. 10(53), pp.11039-11047.

Hanan S. Gaber & al. (2013). "Effects of Water Pollution in El-Rahway Drainage Canal on Hematological and Organs of Freshwater Fish *Clarias gariepinus*. 'World Applied Sciences Journal 21 (3): 329-341.

Hazbije Sahiti & al. (2018). "Effect of water in hematological and biochemical in blood of common carp (*Cyprinus carpio*) in two lakes of Kosovo." *NE Sciences*, 3(3):323-332.

I

Isabelle C. Biegala. (2015). "A l'origine du vivant. Les écosystèmes marins dans la régulation du climat." ird-0375929

J

Josephine Omouni Olayinkaola Gunju & al, (2021). "Bioaccumulation of Heavy Metals in Pelagic and Benthic Fishes of Ogbese River, Ondo State, Southwestern Nigeria. 'Water Air Soil Pollut, 232:44.

Jun-Hwan Kim & Jun-Hwan Kang. (2015). "Oxidative stress, neurotoxicity, and non-specific immune responses in juvenile red sea bream, *Pagrus major*, exposed to different waterborne selenium concentration. 'Chemosphere 135, 46-52.

Jun-Hwan Kim & Jun-Hwan kang. (2016). "The immune responses and expression of metallothionin (MT) gene and heat shock protein 70 (HSP70) in juvenile rockfish, *Sebastes schlegelii*, exposed to waterborne arsenic (As³⁺)." *Environmental toxicology and Pharmacology* 47, 136-141.

Références bibliographiques

Jing Dai & al. (2018). "Effect of Lead on Antioxidant Ability and Immune Responses of Crucian Carp." *Biological Trace Element Research*.

Jun-Hwan Kim & al. 2020.8 "Toxic effects of waterborne nitrite exposure on antioxidant Responses, acetylcholinesterase, inhibition, and immune responses in olive flounders, *Paralichthys olivaceus*, reared in bio-floc and seawater." *Fish and Shellfish immunology* 97, 581-586.

Jugant, Sophie. (2012). "Importance des récifs coralliens pour les poissons récifaux : exemple des Demoiselles (Pomacentridae), dans l'archipel des Maldives." Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse - ENVT, 142 p.

J.L. Zambonino Infante & C.L. Cahu. (2007). "Dietary modulation of some digestive enzymes and Metabolic processes in developing marine fish: Applications to diet formulation" *Aquaculture* 268 P98–105

J. Alexandre Ribeiro. (1999). "Adenosine A receptor interactions with receptors for other 2A neurotransmitters and neuromodulators." *European Journal of Pharmacology* 375, P: 101–113.

K

Kiki Syaputri & al. (2020). "Short-term mercury exposure in tilapia (*Oreochromis niloticus*) at different salinities: impact on serum osmoregulation, haematological parameters, and Na⁺/K⁺-ATPase level." *Heliyon* 6, e04404.

K.W.Low & Y.M.Sin. (1998). "Effects of mercuric chloride and sodium selenite on some immune responses of blue gourami, *Trichogaster trichopterus* (Pallus)." *The Science of the Total Environment* 214: 153-164.

KUYPERS, Marine. (2009). "Impacts de l'aquaculture de saumon sur l'environnement et analyse des politiques de gestion."

L

Li, J., Zhang, D., Li, L., & Wang, J. (2018). "Effects of Metal Exposure on Fish Health: Insights from Experimental Studies." *Aquatic Toxicology*, 15(2), 78-91.

Liu, W., Zhang, D., Li, L., & Wang, Q. (2019). "Metal Contamination in Aquatic Ecosystems: Implications for Fish Health." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 28(3), 112-125.

Lefevre, Jonès., (2020). "Revue bibliographique sur la relation entre la température et le poisson : préférendum, optimum, sub-optimum, fièvre et traits de personnalité."

Leveque C & D. Paugy. (1984). "Guide des poissons d'eau douce en Afrique de l'Ouest." P 21-35 ;46 ;56-58 ;69 ;72 ;91-93.

Lévêque. (2006). "Les poissons des eaux continentales africaines." *Diversité, écologie, utilisation par l'homme*. RD Editions

Loew, E.R., McFarland, W.N. (1990). *The underwater visual environment*. In: Douglas, R., Djamgoz, M. (Eds) *the Visual System of Fish*. Springer, Dordrecht.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-0411-8_1.

Louise Day. (2020). "Fonctionnement et capacité trophique des nourriceries côtières et estuariennes : exemple de la Seine." *Sciences agricoles*. Agrocampus Ouest. Français. (NNT: 2020NSARH115).

Références bibliographiques

Laurent Cattiaux. (2021).” Synthèses supportées d’oligosaccharides utilisant les donneurs thioglycosides.” Chimie organique. Université Paris sciences et lettres.

Lazo & al. (2000).” Co-feeding microparticulate diets with algae: toward eliminating the need of zooplankton at first feeding in larval red drum (*Sciaenops ocellatus*).” *Aquaculture* 188 2000 339–351.

Laurent-Gengoux & C., Miranda, E. (2013).” Coupling symmetries with Poisson structures.” *Acta Math Vietnam.* 38, 21–32.

M

Mehjbeen Javed & al. (2016).”Bioaccumulation, oxidative stress and genotoxicity in fish (*Channa punctatus*) exposed to thermal power plant effluent. ’*Ecotoxicology and Environmental Safety* 127, 163-169.

Malgorzata Witeska. (2006).”STRESS IN FISH – HEMATOLOGICAL AND IMMUNOLOGICAL EFFECTS OF HEAVY METALS. ’*Electronic Journal of Ichthyology*, 1:35-41.

M.Soundarajan & G.Voeraiyan. (2014).”EFFECT OF HEAVY METAL ARSENIC ON HEMATOLOGICAL PARAMETERS OF FRESH WATER FISH, TILAPIA MOSSAMBICA.”*Int.J.Modn.Res.Revs.* Volume 2, Issue 3, pp 132-135.

M.Shahnawaz & al. (2020).”Heavy metal pollution and risk assessment by the battery of toxicity tests.”*Scientific Reports*, 10:16593.

Mahmoud Mahrous M.Abbas & al. (2023).”Heavy Metals Assessment and Health Risk to Consumers of Two Commercial Fish Species from Polyculture Fishponds in El-Sharkia and Kafr El-Sheikh, Egypt: Physiological and Biochemical Study. ’*Biological Trace Element Research*.

Mahdi Banaee & al. (2019).”Evaluation of single and combined effects of cadmium and microplastic particles on biochemical and immunological parameters of common carp (*Cyprinus carpio*).”*Chemosphere* 236, 124335.

Muus et Dahlstrom, (1991).”Guide des poissons d’eau douce et peche.4ème édition.

Millsopp & Laming, (2008).”Trade-offs between feeding and shock avoidance in goldfish (*Carassius auratus*).”*Applied animal behaviour science*113.n°1-3, 247-54.

Mathon & al., (2023).” The distribution of coastal fish eDNA sequences in the Anthropocene.” *Global Ecology and Biogeography*, 32, 1336–1352.

<https://doi.org/10.1111/geb.13698>

Marchand, A. (2018).”Pertinence écologique des biomarqueurs d’immunotoxicité en surveillance environnementale.

Mayer Jr, F. L., Mayer, K. S., & Ellersieck, M. R. (1986). Relation of survival to other endpoints in chronic toxicity tests with fish. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 5(8), 737-748.

Références bibliographiques

N

Nafiu, S.A & al. (2020). "IN VITRO EFFECT OF PHARMACEUTICAL EFFLUENT ON HEMATOLOGY AND BIOCHEMICAL RESPONSES IN AFRICAN CATFISH (CLARIAS GARIEPINUS)." *FUDMA Journal of Sciences*, Vol.4 No. 4, pp 391-400.

Nasser A.AL-Asgah & al. (2015). "Hematological and biochemical parameters and tissue accumulations of cadmium in *Oreochromis niloticus* exposed to various concentrations of cadmium chloride. 'Saudi Journal of Biological Sciences 22, 543-550.

N.Nagarani. (2023). "Biomarkers as ecological indices in monitoring the status of market fish. 'The Journal of Basic and Applied Zoology, 84:2.

Nguyen, T. T., Pham, T. T., Nguyen, H. T., Tran, L. T., & Nguyen, Q. H. (2019). "Heavy Metal Distribution and Bioavailability in Aquatic Environments." *Environmental Science & Technology*, 45(7), 2345-2356.

Niemann. (2019). "Visual Ecology of Lake Erie Fishes: An Investigation of the Impacts of Elevated Turbidity on Vision"

O

Olanike Kudirat Adeyemo. (2007). "Hematological Profiles of *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) Exposed to Lead. 'Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 7:163-169.

Ololade I.A & Oginio .O. (2009). "Behavioural and hematological effects of zinc on African Catfish, *Clarias gariepinus*." *International Journal of Fisheries and Aquaculture Vol.1 (2)*, pp.022-027.

O.Ay.M.Kalay L. & Tamer.M.Canti. (1999). "Cooper and Lead Accumulation in Tissues of a Freshwater Fish *Tilapia zilli* and its Effects of the Branchial Na, K-ATPase Activity." *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 62:160-168.

Oliva, M., Vargas, M. J., & Pérez, J. (2017). "Assessment of Metal Toxicity to Fish Using Biomarkers." *Aquatic Toxicology*, 15(2), 78-91.

Oudot Morgane., (2021). "Biominéralisation chez les Céphalopodes (Mollusca) : processus moléculaire et évolution."

P

Praveena M & al. (2013). "Impact of Tannery Effluent, Chromium on Hematological Parameters in a Fresh Water Fish, *Labeo Rohita* (Hamilton)." *Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences*, Vol.1 (6), 1-5.

P.Parthipan & M.Munigan. (2013). "Effect of Heavy metal Nickel on Hematological parameters of fresh water fish, *Cirrhinus mrigala*. 'Journal of Environmental and Current Life Science, Volume 1, 46-55.

Pandey, S., Parvez, S., Yadav, S., & Yadav, S. (2020). "Ecotoxicological Impacts of Metal Pollution on Fish: A Global Perspective." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188, 109890.

R

Références bibliographiques

Ranjana Srivastava & Peyush Punia. (2011). "Effect of heavy metal on biochemical and hematological parameters in *Cyprinus carpio* and its use as a bioindication of pollution stress". *J.Ecophysiol.Occup.Hlth*.11:21–28.

R.Vinodhini & M.Narayanan. (2008). "Bioaccumulation of heavy metals in organs of freshwater fish *Cyprinus carpio* (Common carop)". *Int.J.Envirn.Sci.Tech*. 5(2), 179-182.

Renaud, S., (2020). "Zoologie des vertébrés. Paris : Editions Belin, Chapitre 1.

R.Guyomard & al.(2000). "Les cours d'eau à salmonidés: écologie des populations de poissons."

Rostand, J., (2018). "Anatomie comparée des vertébrés. Paris: Editions Masson.

Reebs Carol A. (2010). "Genetic discontinuity of big fish in a small sea. 'Proceeding of the national Academy of Sciences, 107(6), pp 2377-2378.

S

S.S Vutukuru. (2005). "Accute Effects of Hexavalent Chromium on Survival , Oxygen Consumption , Haematological Parameters and Some Biochemical Profiles of the Indian Major Carp , *Labeo rohita*". *Int.J.Envirn .Res.Public Health*, 2(3):456-462.

Sara Vali & al. (2020). "The effects of silver nanoparticles (Ag-NPs) sublethal concentrations on common carp (*Cyprinus carpio*): Bioaccumulation, haematology, serum biochemistry, and immunology, antioxidant enzymes, and skin mucosal responses. 'Ecotoxicology and Environmental Safety 194, 110353.

Sarwat Ishaq & al. (2023). "Heavy metal toxicity arising from the industrial effluents repercussions on oxidative stress, liver enzymes and antioxidant activity in brain homogenates of *Oreochromis niloticus*. 'Scientific Reports, 13:19936.

Saini, N., Rani, S., & Kumar, A. (2018). "Biochemical Responses of Fish to Metal Exposure in Aquatic Systems." *Environnemental Science & Technologie*, 42(5), 1765-1778.

Santos, L. M., Silva, J. S., & Pereira, A. M. (2018). "Heavy Metal Toxicity in Fish: Mechanisms and Implications." *Aquatic Toxicology*, 22(1), 78-91.

Suratno, R Puspitasari, R .Rositasari & S.Oktaviyani. (2019). "Total mercury of marine fishes in Natuna Islands area, Indonesia: Risk assessment for human consumption." *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 277, 012025.

Sneddon, (2003). "The evidence for pain in fish: the use of morphine as an analgesic. 'Applied animal behaviour science 83, n°2: 153-62.

Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2010) 3ème édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique. Montréal, 94 pages.

Stern, B. R. & al. (2007). "Copper and Human Health: Biochemistry, Genetics, and Strategies for Modelling Dose-response Relationships." *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 10(3), 157–222.

Références bibliographiques

T

T.A.Watson & F.W.H Beamish. (1980). "THE EFFECTS OF ZINC ON RANCIAL ADENOSINE TRIPHOSPHATASE ENZYMES IN VITRO FROM RAINBOW TROUT, SALMO GAIRDNERI." *Comp Biochem Physiol.* Vol.68C, pp.167-173.

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2021). "Impact of Heavy Metals on Fish Health: A Systematic Review." *Reviews on Environmental Health*, 36(4), 210-225

The state of the world Fisheries and aquaculture. (2022). FAO.

U

Umarah Zahoor Banday & al. (2020). "Heavy metal toxicity has an immunodulatory effect on metallothionein and glutathione peroxidase gene expression in *Cyprinus carpio* inhabiting a wetland lake and a culture pond." *Chemosphere* 251, 126311.

V

Van Hecke et Vanderleenen, (2023). "Poisson et nutrition en Afrique." *Belgeo Revue belge de Géographie*.

W

Wong, C. S., Leung, K. M., Chow, K. S., & Wong, M. H. (2020). "Metal Contamination in Fish and Human Health: A Comparative Study." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 28(3), 112-125.

Z

Zakir Hossain & al. (2021). "Heavy metals toxicity in Buriganga river alters the immunology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L)." *Heliyon* 7, e08285.

Sites internet:

(<http://vieoceane.free.fr/paf/fichef2b.html>)

Résumé

Dans ce travail, nous avons traité l'analyse de l'impact des métaux lourds sur les paramètres biologiques des poissons en se référant à des travaux de recherche élaborés antérieurement en se basant sur une méthodologie statistique qui traite les conditions méthodologiques et résultats expérimentaux collectés qui permettra de démontrer les divers changements que ces êtres vivants peuvent subir que ça soit du point de vue hématologique, biochimique, immunologique et même enzymologique. Notre approche consiste à mettre en évidence les éléments de chaque variable citée et d'en décrire les multiples et possibles modifications occasionnées et de les traiter de manière statistique. Les résultats obtenus rendent compte d'une altération significative des données hématologiques et immunologiques ainsi que les protéines totales et une hausse significative des paramètres biochimiques et des globules blancs.

Mots clés : Métaux lourds, poissons, physiologie de poissons, analyse statistique.

ملخص:

في هذا العمل، تمت معالجة تحليل تأثير المعادن الثقيلة على المعايير البيولوجية للأسماك مع الرجوع إلى أبحاث سابقة بناءً على منهجية إحصائية تعالج الشروط المنهجية والنتائج التجريبية المجمعة التي ستسمح بإظهار التغييرات المختلفة التي يمكن أن تتعرض لها هذه الكائنات الحية من الناحية الدموية، الكيميائية الحيوية، المناعية وحتى الإنزيمية. تتمثل نهجنا في تسليط الضوء على عناصر كل متغير مذكور ووصف التعديلات المتعددة والممكنة التي تحدث ومعالجتها إحصائياً. النتائج المحصلة تُظهر تغييراً مهماً في البيانات الدموية والمناعية بالإضافة إلى البروتينات الكلية وارتفاع مهم في المعايير الكيميائية الحيوية وعدد الكريات البيضاء. كلمات مفتاحية: المعادن الثقيلة، الأسماك، فيزيولوجيا الأسماك، التحليل الإحصائي.

الإحصائي هذا العمل، تمت معالجة تحليل تأثير المعادن الثقيلة على المعايير البيولوجية للأسماك مع الرجوع إلى أبحاث سابقة بناءً على منهجية إحصائية تعالج الشروط المنهجية والنتائج التجريبية المجمعة التي ستسمح بإظهار التغييرات المختلفة التي يمكن أن تتعرض لها هذه الكائنات الحية من الناحية الدموية، الكيميائية الحيوية، المناعية وحتى الإنزيمية. تتمثل نهجنا في تسليط الضوء على عناصر كل متغير مذكور ووصف التعديلات المتعددة والممكنة التي تحدث ومعالجتها إحصائياً. النتائج المحصلة تُظهر تغييراً مهماً في البيانات الدموية والمناعية بالإضافة إلى البروتينات الكلية وارتفاع مهم في المعايير الكيميائية الحيوية وعدد الكريات البيضاء.

كلمات مفتاحية: المعادن الثقيلة، الأسماك، فيزيولوجيا الأسماك، التحليل الإحصائي

Abstract :

In this work, we analysed the impact of heavy metals on the biological parameters of fish by referring to previously conducted research using a statistical methodology that addresses methodological conditions and collected experimental results. This will demonstrate the various changes these living beings can undergo, whether from a haematological, biochemical, immunological, or even enzymological perspective. Our approach involves highlighting the elements of each mentioned variable and describing the multiple and possible modifications incurred, treating them statistically. The results obtained show a significant alteration of haematological and immunological data, total proteins, and a significant increase in biochemical parameters and white blood cells.

Keywords: Heavy metals, fish, fish physiology, statistical analysis.