

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique  
Université Chadli Bendjedid  
El Tarf



جامعة الشاذلي بن جديد

UNIVERSITE CHADLI BENDJEDID

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة الشاذلي بن جديد  
الطارف

كلية علوم الطبيعة والحياة  
قسم علوم البحار

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département de sciences de la mer



**THESE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE DOCTORAT EN SCIENCES**

**Spécialité : Hydrobiologie Marine et Continentale**

**THÈME**

**Evaluation de la santé d'un écosystème à travers l'utilisation  
de l'anguille *Anguilla anguilla* :  
Cas du lac Tonga et l'estuaire du Mafragh**

Présentée Par : Mme Dia Saloua

*Devant le jury composé de :*

*Pr Nasri Hichem*

*Président*

*Univ. Chadli Bendjedid- El Tarf*

*Pr Djebbari Nawel*

*Direct. Thèse*

*Univ. Chadli Bendjedid- El Tarf*

*Pr Bouallegu Chahinez*

*Examinatrice*

*Univ. M.C Messaidia- Souk Ahras*

*Dr Rachedi Mounira*

*Examinatrice*

*Univ. Chadli Bendjedid- El Tarf*

*Dr Allalgua Amel*

*Examinatrice*

*Univ. M.C Messaidia- Souk Ahras*

≈ Année universitaire 2024 - 2025 ≈

## **Remerciements**

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

*Cette thèse a été menée dans un contexte de recherche scientifique engagé pour la préservation de l'anguille européenne, espèce emblématique et aujourd'hui menacée.*

*Je souhaite témoigner ma profonde reconnaissance au **Professeur : Nasri Hichem** Président du jury, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'évaluer ce travail, malgré un emploi du temps particulièrement chargé. Sa rigueur scientifique et son regard critique m'apportent un éclairage précieux pour la valorisation de mes résultats.*

*Je remercie vivement les honorables membres du jury en tant qu'examinatrices pour l'honneur qu'elles me font d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail : **Pr Bouallegu Chahinez, Dr Rachedi Mounira et Dr Allagua Amel.***

*Mes remerciements sincères s'adressent également à **Madame : Djebbari Nawel**, mon encadrante, pour son encadrement bienveillant, ses conseils avisés et sa confiance tout au long de ce travail. Sa disponibilité et ses encouragements constants ont été déterminants pour mener à bien ce projet de thèse.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au **Professeur : Bensouilah Morad**, pour m'avoir généreusement ouvert les portes de son laboratoire et permis de réaliser dans d'excellentes conditions l'étude biochimique nécessaire à ce travail. Sa disponibilité, son soutien matériel et scientifique ont grandement contribué à la réussite de cette recherche, et je lui en suis infiniment reconnaissante.*

*J'exprime toute ma gratitude aussi à : **Pr Taheri Mardja et Dr Bensafia Nabila** pour leurs conseils avisés, leur soutien scientifique et leur contribution précieuse à l'aboutissement de ce travail. Sans oublier : **Bouassela Chahera** pour sa patience et sa disponibilité qui m'ont été d'une aide inestimable durant mon étude biochimique.*

*Je tiens à remercier sincèrement **l'Institut National de Criminalistique et de Criminologie de la Gendarmerie Nationale** pour m'avoir accueillie et mis à disposition ses installations analytiques et pour l'accès aux équipements nécessaires à la réalisation du dosage des métaux lourds, qui ont constitué une étape clé dans ce travail.*

*Ma gratitude va également à mes chers collègues à l'école technique de pêche et d'aquaculture d'El Kala particulièrement **Bechania Nader**, pour leurs encouragements constants et leurs soutien moral tout au long de cette aventure.*

## **Dédicaces**

*À tous ceux qui me sont chers, ceux à qui je dois une part de ce succès :*

*À Toi, Seigneur Tout-Puissant, source de toute vie et de toute lumière : merci de m'avoir offert la foi, la force et l'endurance pour accomplir ce parcours. Merci pour les prières exaucées et les chemins ouverts vers l'aboutissement de ce travail.*

*À celui qui, un jour, m'a regardée comme la prunelle de ses yeux, qui a vu en chacun de mes pas une grande victoire : à l'homme qui a fait de moi ce que je suis, mon père, **POUPPA**. Dans ton regard, je lis la fierté, l'amour, la compréhension, la patience et la générosité.  
Grâce à toi, j'ai appris à me dépasser pour te rendre fier, encore et toujours.*

*À celle dont les paroles m'accompagnent depuis mon enfance, mon modèle de force et de résilience, ma première héroïne : **MAMA**. À la femme forte qui a tant souffert sans jamais me faire sentir le poids de ses douleurs, qui m'a enseigné à être courageuse, persévérante, déterminée. Celle qui m'a poussée à poursuivre mes rêves, même lorsque tout semblait s'écrouler.  
Ton amour inconditionnel et ta présence sont la lumière de mon chemin.*

*À toi, mon amour, mon époux : **Mister Hatem**, compagnon de vie, de rêves et de luttes, Tu as cru en moi même lorsque je doutais, tu m'as soutenue dans le silence et dans les mots, et tu as su transformer chaque fatigue en courage. Ce travail est aussi le fruit de ton amour fidèle et de ta foi en moi. Ce chemin, nous l'avons parcouru ensemble.*

*À mes enfants chéris, trésors de ma vie : **Aridj, Aymen, Aya et Abdel-Kader**, ma raison de persévérer et ma plus grande fierté, votre innocence, votre amour et votre simple présence ont adouci les journées les plus dures. Ce travail, je l'ai accompli avec vous dans mon cœur à chaque instant.*

*À mes chers **sœurs** et **frères**, piliers discrets mais essentiels de ma vie, merci pour votre présence réconfortante, vos encouragements et votre amour indéfectible. Votre soutien, qu'il soit silencieux ou exprimé, a compté plus que vous ne l'imaginez.*

*À mes adorables **nièces** et **neveux**, vos sourires, votre joie de vivre et votre affection spontanée ont été un véritable rayon de soleil durant ce parcours. Merci d'avoir embelli mes journées les plus chargées, Ce travail vous est dédié avec tout mon amour.*

*À ma meilleure amie : **Yassa**, confidente de toujours, merci pour ton écoute, ton soutien sans faille et ta présence lumineuse dans les moments de doute comme dans les instants de bonheur. Ton amitié a été une véritable force tout au long de ce parcours*

*À toi aussi, chère **Fayza**, pour ton amitié fidèle, même à distance ton soutien, tes encouragements ont été ressentis à chaque étape de ce travail, et je t'en remercie sincèrement.*

*À toute ma famille : **Dia et Fares**. Merci d'avoir été là, avec vos mots justes, vos regards complices, votre énergie lumineuse. Vous avez enrichi mon parcours de mille façons.*

*À toutes les personnes formidables croisées dans cette aventure : que ce travail reflète l'écho de vos prières, le fruit de votre soutien et l'accomplissement de vos vœux sincères.*

*Je rends hommage à mon beau-père : **Fares Abdel-Kader** (qu'Allah lui fasse miséricorde), dont le souvenir reste vivant en moi, notamment à travers sa phrase qui m'accompagne encore :« Sans doute, il n'est jamais trop tard pour bien faire. »*

*Que ce travail soit une pensée respectueuse et affectueuse dédiée à sa mémoire.*

*Et enfin...*

*Je dédie ce travail à **moi-même**. Parce qu'il est temps, enfin, **d'y être**.*

***Saloua***

## LISTE DES FIGURES

Figures	Titre	Page
1	<i>Planche naturaliste de l'anguille européenne (<a href="https://www.observatoire-rhonemediterranee.fr">https://www.observatoire-rhonemediterranee.fr</a>)</i>	6
2	<i>Aire de distribution potentielle de l'anguille Européenne <i>Anguilla anguilla</i> AESG (2020).</i>	7
3	<i>Larve leptocéphale d'anguille européenne (<a href="http://www.bateaux.com">www.bateaux.com</a>)</i>	9
4	<i>Estimation de la durée de la migration transatlantique des larves leptocéphales vers le plateau continental (d'après Bonhommeau et al., 2010, modifié).</i>	9
5	<i>Civelles d'anguille européenne <i>Anguilla anguilla</i> capturées à l'Oued Messida (Présent travail)</i>	10
6	<i>Anguille Européenne à différents stades : argenté (a) ; jaune (b et c). (Derouiche, E ; 2016)</i>	11
7	<i>Cycle biologique de l'anguille européenne <i>Anguilla anguilla</i> (Alain et Coralie, 2013)</i>	14
8	<i>Aire de répartition de l'anguille européenne (<i>Anguilla anguilla</i> L., 1758), adaptée de Germain (1927) pour l'aire continentale et Schmidt (1924) pour la répartition océanique des larves. (<a href="https://www.observatoire-rhonemediterranee.fr">https://www.observatoire-rhonemediterranee.fr</a>)</i>	15
9	<i>Reproduction d'anguille européenne <i>Anguilla anguilla</i> en condition artificielle (Fazio, 2009).</i>	17
10	<i>Anguilles jaunes enfouies dans le sable (Musée Dar el Hout, INSTM Salammbô (Derouiche E, 2016)</i>	21
11	<i>Production mondiale en Tonne de l'anguille européenne en aquaculture (FAO, 2015).</i>	23
12	<i>Estimations par GLM (recrutement ~ zone : année + site) des niveaux de recrutement moyen pour la civelle en Europe et en Mer du Nord (ICES WGEEL, 2013b)</i>	24
13	<i>Indice de recrutement : moyenne de recrutement de civelles estimée pour la mer du Nord et ailleurs en Europe mis à jour pour 2013 et standardisé à la moyenne 1960-1979 (ICES, 2014)</i>	25
14	<i>Inscription de l'anguille européenne à liste rouge de l'UICN comme espèce en danger critique (d'après Jacoby et Gollock, 2014)</i>	33
15	<i>Localisation du lac Tonga</i>	35
16	<i>Localisation de l'estuaire du Mafragh</i>	37
17	<i>La variabilité interannuelle de la température au niveau de la ville d'Annaba et la région d'El Kala, respectivement, (a et b) des précipitations (c et d), et du vent (e et f) en se basant sur des données météorologiques collectées par l'ONM dans l'Est algérien pendant la dernière décennie</i>	41
18	<i>Engin de pêche de l'anguille « nasses » (Présent travail)</i>	42
19	<i>Mesures biométriques des anguilles capturées (à gauche : mesure de la taille ; à droite : prise de poids) (Présent travail)</i>	43
20	<i>Mensurations de la nageoire pectorale (Lp) (Présent travail)</i>	46
21	<i>Mensurations du diamètre horizontal (Dh) et vertical (Dv) de l'œil (Présent travail)</i>	46
22	<i>Photographie d'une anguille disséquée : A ; Organes prélevés après dissection : B (a : vessie gazeuse ; b : tube digestif ; c : foie et d : gonades) ; Pesée de l'anguille éviscérée :C (Présent travail).</i>	48

23	<i>Pesée des gonades (Présent travail)</i>	49
24	<i>Pesée du foie (Présent travail)</i>	50
25	<i>Pesée du tube digestif vide (Présent travail)</i>	50
26	<i>Prélèvement des otolithes (Présent travail)</i>	51
27	<i>Interprétation des marques de croissance à partir d'un otolithe d'anguille âgée de 55 mois (4 ans+) (Tahri, 2016).</i>	52
28	<i>Calcul théorique de l'âge d'anguille à partir d'otolithe (Panfili et al., 2002).</i>	53
29	<i>Tube digestif d'une anguille capturée (présence d'un poisson dans l'estomac) (Présent travail)</i>	54
30	<i>Prélèvement et conservation des branchies (Présent travail)</i>	55
31	<i>Conservation des parasites (Présent travail)</i>	56
32	<i>Récolte d'un morceau de muscle et du foie pour les congeler. (Présent travail)</i>	58
33	<i>Etuve et four à moufle. (Présent travail)</i>	59
34	<i>Minéralisation à chaud des échantillons (à gauche au bain marie, et à droite sur plaque chauffante). (Présent travail)</i>	60
35	<i>Filtration des minéralisât (Présent travail)</i>	60
36	<i>Dilution des échantillons minéralisés (Présent travail)</i>	61
37	<i>Appareil de Spectrophotométrie d'absorption Atomique à four graphite. (Présent travail)</i>	61
38	<i>Dosage des métaux lourds (Fer, Zinc, Plomb et Cadmium) par SAA. (Présent travail)</i>	62
39	<i>Effectif observé au sein de différentes classes de taille des anguilles (Anguilla anguilla) capturées au lac Tonga</i>	64
40	<i>Relation entre le coefficient de croissance (K) et l'indice de performance de croissance (<math>\Phi'</math>) pour la population d'anguilles du lac Tonga (Méthode d'ELEFEN-I)</i>	66
41	<i>Indice de performance de croissance : paramètres asymptotiques des anguilles du lac Tonga (logiciel FISSAT II)</i>	67
42	<i>Relation logarithmique entre la longueur totale et le poids des anguilles du lac Tonga avec ajustement de régression linéaire</i>	70
43	<i>Effectif observé au sein de différentes classes de taille des anguilles (Anguilla anguilla) de la Mafrag</i>	71
44	<i>Relation entre le coefficient de croissance et l'indice de performance de croissance des anguilles de l'estuaire de la Mafrag (Méthode d'ELEFEN-I)</i>	73
45	<i>Indice de performance de croissance : paramètres asymptotiques des anguilles de l'estuaire de la Mafrag (logiciel FiSAT II)</i>	74
46	<i>Relation logarithmique entre la longueur et le poids des anguilles de l'estuaire de la Mafrag</i>	77
47	<i>Évolution mensuelle du coefficient de vacuité chez les anguilles du lac Tonga</i>	83
48	<i>Évolution du coefficient de vacuité en fonction de la classe de taille des anguilles des deux sites</i>	84
49	<i>Évolution du coefficient de vacuité en fonction de la classe d'âge des anguilles.</i>	85
50	<i>Fréquences des proies ingérées par l'anguille capturée aux deux plans d'eaux</i>	86
51	<i>Proportions des proies ingérées par les anguilles des différentes classes de taille</i>	87
52	<i>Proportions des proies ingérées par les anguilles des différentes classes d'âge dans les deux plans d'eaux.</i>	88
53	<i>Photographie de Pseudodactylogyrus sp. (Gr x40). (Présent travail)</i>	91
54	<i>Photographie d'Ergasilus gibbus (Présent travail)</i>	92
55	<i>Anguillicoloides crassus (femelle à droite, mâle à gauche) (Présent travail)</i>	93

56	<i>Cycle de vie d'Anguillicola crassus. Le cycle de vie de base (flèche bleue) comprend les anguilles comme hôtes finaux et les copépodes comme hôtes intermédiaires. En intégrant des paraténiques supplémentaires hôtes (p. ex., poissons), le cycle de vie peut être prolongé (flèche blanche). (Moravec, 2006).</i>	94
57	<i>Vessie gazeuse d'une anguille massivement infestée par Anguillicola crassus (A). Différents stades (larves et adultes) (B). Adulte sous microscope G40 (C). (Présent travail)</i>	95
58	<i>Anguille argentée massivement infestée par Eustrongylides sp (Présent travail)</i>	96
59	<i>L'espèce de nématode Eustrongylides sp récoltée d'anguille de l'estuaire de Mafragh (A) ; Extrémité antérieure de Eustrongylides sp; Agrandissement de 100x. (Présent travail)</i>	97
60	<i>Cycle biologique d'Eustrongylides sp. (Castiglione, D. et al. 2023).</i>	98
61	<i>L'espèce Bothriocephalus claviceps bien apparente de la récolte des échantillons d'anguilles (A) ; Tube digestive massivement infesté par Bothriocephalus claviceps (B) ; Scolex montrant les deux ventouses(C) ; proglottis gravides (D), Agrandissement de 40x. (Présent travail)</i>	100
62	<i>A : Larve de cestode Bothriocephalus sp trouvé au niveau des intestins des anguilles examinées ; B : photo de cette larve sous microscope G40. (Présent travail)</i>	101
63	<i>Acanthocephalus d'Anguilla anguilla (A) ; Proboscis d'un Echinorhynchus sp femelle (B) ; male (C) (Présent travail)</i>	103
64	<i>Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalence (P%) ; B : Abondance (A) et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles du lac Tonga en fonction de leurs classes de taille</i>	105
65	<i>Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalence (P%) ; B : Abondance (A) et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles du lac Tonga en fonction de leurs classes d'âge</i>	107
66	<i>Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalence (P%) ; B : Abondance (A) et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles de la Mafragh en fonction de leurs classes de taille</i>	109
67	<i>Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalence (P%) ; B : Abondance (A) et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles de la Mafragh en fonction de leurs classes d'âge</i>	111
68	<i>Résultats du modèle binomial négatif à inflation de zéro examinant les facteurs influençant l'abondance des parasites recensés des anguilles des deux plans d'eau.</i>	113
69	<i>Concentration moyenne en métaux traces : Pb, Cd, Fe et Zn (µg/g poids sec : PS) dans le muscle et le foie des anguilles du lac Tonga et l'estuaire de la Mafragh.</i>	117
70	<i>Variations inter-sites, inter-organe et selon le degré d'infestation concernant les métaux lourds et le type de parasite.</i>	119
71	<i>Corrélation de Pearson entre la contamination aux métaux lourds et l'infestation parasitaire chez Anguilla anguilla.</i>	120
72	<i>Analyse en composante principale des différents paramètres étudiés.</i>	121
73	<i>Analyse en composantes principales (ACP) des individus selon le site, l'organe et le degré d'infestation chez Anguilla Anguilla..</i>	122
74	<i>Variation de concentration en Pb (µg/g poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille.</i>	123

75	<i>Variation de concentration en Pb (<math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes d'âge</i>	124
76	<i>La concentration moyenne de plomb (Pb en <math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasitées) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.</i>	125
77	<i>Variation de concentration en Cd (<math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille</i>	126
78	<i>Variation de concentration en Cd (<math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes d'âge</i>	127
79	<i>La concentration moyenne du Cadmium (Cd en <math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasitées) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.</i>	128
80	<i>Variation de concentration en Fe (<math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille</i>	129
81	<i>Variation de concentration en Fe (<math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille</i>	130
82	<i>La concentration moyenne du Fer (Fe en <math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasitées) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.</i>	131
83	<i>Variation de concentration en Zn (<math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille</i>	132
84	<i>Variation de concentration en Zn (<math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes d'âge.</i>	133
85	<i>La concentration moyenne du Zinc (Zn en <math>\mu\text{g/g}</math> poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasitées) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.</i>	134

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
1	<i>Statistiques de production de l'Anguille 2000-2008 (CNDRPA ; 2018).</i>	32
2	<i>Coefficient de pondération pour la détermination de chaque stade de l'anguille (Durif et al., 2005).</i>	47
3	<i>Paramètres de croissance selon le modèle de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles (Anguilla anguilla) du lac Tonga</i>	65
4	<i>Équation de croissance de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles du lac Tonga</i>	68
5	<i>Paramètres de régression longueur-poids et qualité de croissance des anguilles du lac Tonga</i>	68
6	<i>Paramètres et équations de la relation longueur-poids pour la population d'anguilles du lac Tonga</i>	69
7	<i>Paramètres de croissance selon le modèle de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles de l'estuaire de la Mafrag</i>	72
8	<i>Équation de croissance de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles de l'estuaire de la Mafrag</i>	75
9	<i>Paramètres de régression longueur-poids et qualité de croissance des anguilles de l'estuaire de la Mafrag</i>	75
10	<i>Paramètres et équations de la relation longueur-poids pour la population d'anguilles de la Mafrag</i>	76
11	<i>Relation entre les phases de migration et les stades de maturité sexuelle chez les anguilles selon (Durif et al. 2005).</i>	78
12	<i>Valeur Moyenne et écart-type de la longueur, du poids et de l'âge des anguilles en fonction du stade de vie et de l'argenture (Durif et al., 2005).</i>	79
13	<i>Variables morphologiques et anatomiques (valeurs moyennes et écart-type) des anguilles en fonction du stade de vie et de l'argenture (Durif et al., 2005, Durif et al., 2009).</i>	80
14	<i>Résultats de l'analyse des contenus digestifs des anguilles capturées sur deux sites, Tonga et Mafragh</i>	82
15	<i>Paramètres épidémiologiques : Prévalence (P%), abondance (A) et Intensité moyenne (I) des parasites recensés chez les anguilles du lac Tonga et l'estuaire du Mafrag.</i>	104
16	<i>Comparaison des charges parasitaires entre les stades de développement des anguilles : Analyse des contrastes par paires et significativité statistique</i>	114
17	<i>Sommaire des concentrations en métaux lourds, de la répartition organique et selon l'infestation parasitaire chez Anguilla anguilla dans deux sites d'étude (Mean ± SD).</i>	116
18	<i>Comparaison inter-sites, inter-organes et selon le degré d'infestation</i>	118

## TABLE DES MATIERES

### Résumé

#### Introduction

*	Introduction.....	1
*	Objectifs de la thèse .....	2

#### Chapitre I : Généralités

1.	Présentation de l'anguille européenne ( <i>Anguilla anguilla</i> ).....	5
2.	Morphologie.....	5
3.	Aires de répartition.....	7
4.	Cycle de vie.....	8
4.1.	Phase de migration transatlantique : Stade larvaire ( <i>Leptocéphale</i> ).....	8
4.2.	Phase de la première métamorphose et migration anadrome.....	9
4.3.	Phase de sédentarisation et croissance : Stade anguille jaune.....	11
4.4.	Phase de la deuxième métamorphose et préparation à la migration catadrome : Stade Anguille argentée.....	12
4.5.	Phase de reproduction.....	14
5.	Dimorphisme sexuel de l'anguille.....	18
6.	Caractéristiques bioécologiques.....	19
6.1.	Milieus de vie et habitats.....	19
6.2.	Régime alimentaire.....	20
7.	Importance économique.....	21
8.	Etat du stock.....	23
9.	Déclin de l'anguille européenne.....	25
10.	La contamination et la bioaccumulation métallique chez l'anguille européenne.....	28
11.	L'anguille en Algérie.....	30
12.	Mesures de protection.....	32

#### Chapitre II : Matériels et méthodes

1.	Présentation des sites d'étude.....	34
1.1.	Lac Tonga.....	34
1.2.	L'estuaire du Mafragh.....	37
1.3.	Les données météorologiques de la zone d'étude.....	38
2.	Capture et traitement des anguilles.....	42
<i>Axe 1 : Structure de la sous population d'anguille étudiée (Croissance et argenture)</i>		
1.	Croissance corporelle.....	43
2.	Stades d'argenture.....	45
3.	Otolithométrie .....	50
<i>Axe 2. Analyse du régime alimentaire chez l'anguille européenne (A. anguilla)</i>		
1.	Analyse de l'état nutritionnel des anguilles échantillonnées.....	54
<i>Axe 3. Biodiversité de la faune parasitaire chez l'anguille européenne (A. anguilla)</i>		
1.	Ectoparasites.....	55
2.	Endoparasites.....	55
<i>Axe 4 : Contamination et bioaccumulation métallique chez l'anguille européenne</i>		
1.	Protocole expérimental et traitement des échantillons.....	58
2.	Dosage des métaux traces.....	62
3.	Analyses statistiques .....	63

#### Chapitre III : Résultats

<i>Axe 1. Structure de la sous population d'anguille étudiée (croissance et argenture)</i>		
1.	Caractéristique de la population d'anguilles du lac Tonga.....	64

1.1.	<i>Proportion des effectifs des classes de tailles des anguilles collectées dans le lac Tonga</i> .....	64
1.2.	<i>Paramètres de croissance selon Von Bertalanffy (logiciel ELEFEN-I)</i> .....	65
1.3.	<i>Paramètres de croissance des anguilles du lac Tonga (logiciel FISSAT II)</i> .....	67
1.4.	<i>Relation taille-poids et qualité de croissance</i> .....	68
1.5.	<i>Relation logarithmique taille-poids et croissance</i> .....	69
2.	<i>Caractéristique de la population d'anguilles de l'estuaire de la Mafrag</i> .....	71
2.1.	<i>Proportion des effectifs des classes de tailles des anguilles collectées dans la Mafrag</i> .....	71
2.2.	<i>Paramètres de croissance selon Von Bertalanffy (logiciel ELEFEN-I)</i> .....	72
2.3.	<i>Paramètres de croissance des anguilles du lac Tonga (logiciel FISSAT II)</i> .....	74
2.4.	<i>Relation taille-poids et qualité de croissance</i> .....	75
2.5.	<i>Relation logarithmique taille-poids et croissance</i> .....	76
3.	<i>Stades d'Argenture</i> .....	78
<b>Axe 2. Analyse du régime alimentaire chez l'anguille européenne (<i>A. anguilla</i>)</b>		
1.	<i>Analyse de l'état nutritionnel des anguilles échantillonnées</i> .....	82
1.1.	<i>Coefficient de vacuité</i> .....	83
1.2.	<i>Fréquences d'apparition des proies (F%)</i> .....	85
<b>Axe 3. Biodiversité de la faune parasitaire chez l'anguille européenne (<i>A. anguilla</i>)</b>		
1.	<i>Présentation des parasites recensés</i> .....	90
1.1.	<i>Ectoparasites</i> .....	90
1.2.	<i>Endoparasites</i> .....	93
2.	<i>Diversités parasitaires</i> .....	104
2.1.	<i>Variation des indices épidémiologiques chez les anguilles du lac Tonga</i> .....	105
2.2.	<i>Variation des indices épidémiologiques chez les anguilles de l'estuaire du Mafragh</i> .....	109
3.	<i>Analyse statistique</i> .....	113
<b>Axe 4. Contamination et bioaccumulation métallique chez l'anguille (<i>A. anguilla</i>)</b>		
1.	<i>Analyse de la contamination métallique chez <i>Anguilla anguilla</i></i> .....	116
2.	<i>Le plomb (Pb)</i> .....	123
3.	<i>Le cadmium (Cd)</i> .....	126
4.	<i>Le fer (Fe)</i> .....	129
5.	<i>Le zinc (Zn)</i> .....	132
<b>Chapitre IV : Discussions</b>		
1.	<i>Structure de la sous population étudiée</i> .....	135
2.	<i>Analyse du régime alimentaire</i> .....	142
3.	<i>Biodiversité de la faune parasitaire</i> .....	145
4.	<i>Contamination et bioaccumulation métallique</i> .....	149
<b>Chapitre V : Conclusion et perspectives</b>		
1.	<i>Conclusion</i> .....	155
2.	<i>Perspectives</i> .....	156
<b>Références bibliographiques</b>		
	<i>Références bibliographiques</i> .....	158



■ **Résumé :**

Cette thèse vise à caractériser la structure démographique, le régime alimentaire, la diversité parasitaire et la bioaccumulation des métaux lourds chez l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) dans deux milieux aquatiques contrastés : le lac Tonga et l'estuaire du Mafragh. Au niveau du lac Tonga, la population se compose majoritairement d'individus de taille intermédiaire (450–550 mm), présentant une croissance modérée à soutenue ( $K = 0,54$ ), ainsi qu'une relation taille-poids de type allométrique positive ( $b = 3,22$ ). L'alimentation est dominée par les poissons (44,34 %) et les insectes (32,08 %), avec un coefficient de vacuité moyen estimé à 41,11 %, traduisant une activité trophique relativement modérée. Sur le plan parasitologique, les espèces les plus fréquemment rencontrées sont *Pseudodactylogyrus* sp., avec une prévalence de 66,11 % au lac Tonga et de 69,07 % à l'estuaire du Mafragh, suivie par *Bothriocephalus claviceps* (27,22 % à Tonga) et *Anguillicoloides crassus*, particulièrement dominant au Mafragh avec un taux d'infestation de 64,95 %. Concernant les métaux lourds, les teneurs les plus élevées sont relevées dans le foie (Fe : 1541,28 µg/g ; Pb : 1,79 µg/g) et dans le muscle pour le zinc (Zn : 265,32 µg/g). Dans l'estuaire du Mafragh, les anguilles affichent une croissance plus rapide ( $K = 1,50$ ) et une performance de croissance supérieure ( $\emptyset' = 6,082$ ), avec une prédominance des classes de taille intermédiaires (600–690 mm). Le régime alimentaire est principalement composé d'insectes (65,38 %) et de crustacés (43,59 %), et le coefficient de vacuité y est plus faible (19,59 %), indiquant une activité trophique accrue. Les parasites les plus courants sont *Pseudodactylogyrus* sp. (69,07 %) et *Anguillicola crassus* (64,95 %). Les concentrations en métaux lourds sont plus marquées dans le foie (Fe : 1258,58 µg/g ; Pb : 5,11 µg/g) par rapport au muscle, avec une accumulation plus importante observée chez les individus parasités.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence l'influence des paramètres environnementaux et de la disponibilité alimentaire sur la dynamique des populations d'anguilles. Ils apportent ainsi des éléments clés pour la gestion durable et la conservation de cette espèce menacée.

**Mots-clés :** *Anguilla anguilla* – Tonga – Mafragh – Parasitisme – Etude biochimique.



▪ **Abstract :**

This thesis is concerned with the characterization of the population structure, feeding ecology, parasitic diversity, and heavy metal bioaccumulation in European eels (*Anguilla anguilla*) across two distinct aquatic ecosystems in northeastern Algeria : Lake Tonga (freshwater) and the Mafragh Estuary (brackish water). In Lake Tonga, the eel population is mainly composed of intermediate-sized (450–550 mm), with moderate to rapid growth ( $K = 0.54$ ) and a positive allometric length–weight relationship ( $b = 3.22$ ). From a parasitological perspective, the most frequently encountered species were *Pseudodactylogyrus* sp., with a prevalence of 66.11% in Lake Tonga and 69.07% in the Mafragh estuary, followed by *Bothriocephalus claviceps* (27.22% in Tonga) and *Anguillicoloides crassus*, which was particularly dominant in Mafragh with an infestation rate of 64.95%. Heavy metals were primarily concentrated in the liver (Fe : 1541.28  $\mu\text{g/g}$  ; Pb : 1.79  $\mu\text{g/g}$ ), while zinc was highest in muscle tissues (Zn : 265.32  $\mu\text{g/g}$ ). In contrast, eels from the Mafragh Estuary exhibited faster growth ( $K = 1.50$ ) and a higher growth performance index ( $\emptyset'$

= 6.082), with size classes dominated by individuals ranging from 600 to 690 mm. Their diet was richer in insects (65.38%) and crustaceans (43.59%), with a lower gut vacuity rate (19.59%), reflecting increased feeding activity. The most common parasites were also *Pseudodactylogyrus* sp. (69.07%) and *Anguillicola crassus* (64.95%). Metal accumulation was higher in the liver (Fe : 1258.58  $\mu\text{g/g}$  ; Pb : 5.11  $\mu\text{g/g}$ ) than in the muscle, with a marked increase in parasitized individuals.

These findings highlight the influence of environmental factors and trophic resource availability on eel population dynamics. The results provide essential baseline data to inform future conservation and management strategies for this critically endangered species.

**Keywords :** *Anguilla anguilla* –Tonga – Mafragh – Parasitism – Biochemical study



■ ملخص:

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة بنية الجماعة السكانية، والبيئة الغذائية، وتنوع الطفيليات، والتراكم الحيوي للمعادن الثقيلة لدى أنقليس المياه الأوروبية (*Anguilla anguilla*) في نظامين بيئيين مائيين متميزين في شمال شرق الجزائر: بحيرة طنقة (مياه عذبة) ومصب المفرغ (مياه شبه مالحة).

في بحيرة طنقة، تتكوّن غالبية الجماعة السكانية من أفراد متوسطي الحجم (450–550 مم)، مع معدلات نمو تتراوح بين متوسطة وسريعة) معامل النمو ( $K = 0.54$ ، وعلاقة وزن-طول إيجابية ألو مترية ( $b = 3.22$ ). يتكوّن النظام الغذائي بشكل رئيسي من الأسماك (44.34%) والحشرات (32.08%)، مع معدل فراغ معدي متوسط يبلغ 41.11%، مما يشير إلى نشاط تغذوي متوسط. من الناحية الطفيلية، كانت الأنواع الأكثر شيوعاً هي *Pseudodactylogyrus sp.*، حيث بلغت نسبة الانتشار 66.11% في بحيرة طنقة و 69.07% في مصب المفرغ، تليها *Bothriocephalus claviceps* (بنسبة 27.22% في طنقة) و *Anguillicoloides crassus*، الذي سجّل كمهيمن بشكل خاص في المفرغ بنسبة إصابة بلغت 64.95%. وقد تم رصد تركيز المعادن الثقيلة بشكل رئيسي في الكبد (الحديد Fe: 1541.28 ميكروغرام/غرام؛ الرصاص Pb: 1.79 ميكروغرام/غرام)، بينما سجّل أعلى تركيز للزنك في عضلات الأسماك (الزنك Zn: 265.32 ميكروغرام/غرام).

في المقابل، أظهرت الأنقليات من مصب المفرغ نمواً أسرع ( $K = 1.50$ ) ومؤشر أداء نمو أعلى ( $\emptyset' = 6.082$ )، مع سيطرة للأفراد ضمن الفئة الحجمية 600–690 مم. اتسم نظامها الغذائي بغنى أكبر بالحشرات (65.38%) والقشريات (43.59%)، مع معدل فراغ معدي أقل (19.59%)، مما يدل على نشاط تغذوي مرتفع. أكثر الطفيليات شيوعاً في هذه البيئة أيضاً كانت *Pseudodactylogyrus sp.* (69.07%) و *Anguillicola crassus* (64.95%) وقد سجّل تراكم معدني أعلى في الكبد (Fe: 1258.58 ميكروغرام/غرام؛ Pb: 5.11 ميكروغرام/غرام) مقارنة بالعضلات، مع ارتفاع واضح في الأفراد المصابين بالطفيليات.

تُبرز هذه النتائج تأثير العوامل البيئية وتوفر الموارد الغذائية على ديناميكيات جماعات الأنقليس. كما توفر هذه المعطيات الأساسية مرجعية علمية ضرورية للمساهمة في توجيه استراتيجيات الحفظ والإدارة المستقبلية لهذا النوع المهدد بخطر الانقراض الحرج.

الكلمات المفتاحية: *Anguilla anguilla* - طنقة - المفرغ - الطفيليات -دراسة كيميائية حيوية

**Introduction :**

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*, [Linné, 1758](#)) constitue une espèce emblématique des milieux aquatiques d'Europe et du pourtour méditerranéen, notamment en Afrique du Nord. Son cycle de vie catadrome, marqué par une migration transocéanique vers la mer des Sargasses pour la reproduction, puis un retour en eau douce ou saumâtre durant sa croissance, en fait un modèle biologique à la fois unique et complexe. Cette biologie singulière, couplée à sa longévité et à sa position élevée dans les réseaux trophiques, confère à l'anguille un rôle clé comme bioindicateur des altérations environnementales. Cependant, les populations d'anguilles européennes ont connu, au cours des dernières décennies, une chute alarmante, atteignant des niveaux historiquement bas. Ce déclin massif est aujourd'hui reconnu comme multifactoriel : surpêche, barrages et obstacles à la migration, dégradation des habitats, changements climatiques, pollution chimique, et parasitisme croissant. Face à cette situation critique, *A. anguilla* a été classée en danger critique d'extinction par l'UICN ([Jacoby & Gollock, 2014](#); [Pike et al., 2020](#)) et figure à l'Annexe II de la CITES, ce qui souligne la nécessité urgente de mettre en œuvre des actions de conservation fondées sur des bases scientifiques solides.

En tant qu'espèce sentinelle, l'anguille réagit fortement aux perturbations de son environnement. Elle est particulièrement vulnérable à l'accumulation de contaminants persistants tels que les métaux lourds, mais aussi aux infestations parasitaires, notamment celles impliquant *Anguillicoloides crassus*, un nématode introduit affectant la vessie natatoire. Ces facteurs de stress cumulés peuvent altérer ses capacités physiologiques, freiner sa croissance, et surtout compromettre sa migration reproductrice. Ainsi, l'étude intégrée de la biologie de cette espèce permet de diagnostiquer à la fois l'état sanitaire des populations d'anguilles et la qualité écologique des écosystèmes aquatiques qu'elles colonisent.

Cette recherche s'attache à évaluer la santé de deux milieux aquatiques contrastés en Algérie : le lac Tonga (eau douce) et l'estuaire du Mafragh (milieu saumâtre), en prenant l'anguille européenne comme espèce modèle. Ces deux sites, situés au sein de la réserve de biosphère d'El Kala, région reconnue pour sa haute valeur écologique, abritent encore des populations d'anguilles malgré des pressions environnementales croissantes telles que les pollutions organiques et métalliques, la fragmentation des habitats, les perturbations hydrologiques et la surexploitation. À l'instar des tendances observées à l'échelle européenne, ces contraintes locales participent au déclin progressif des effectifs. En Algérie, plusieurs études ont déjà porté sur *Anguilla anguilla*, en explorant notamment sa croissance ou son parasitisme, ([Bakaria et al., 2018](#); [Boudjadi et al., 2009](#); [Derbal & Ariba, 2024](#); [Djebbari et al., 2009](#); [Djouahra & Arab,](#)



2017; Mardja et al., 2019; Nabil et al., 2009; Tahri et al., 2018; Tahri & Bensouilah, 2023; Zard-Gharsallah et al., 2021). Mais rares sont celles qui abordent de manière intégrée et comparative l'ensemble des facteurs biologiques et environnementaux influençant sa dynamique.

Les statistiques de la FAO et les données nationales confirment cette dynamique inquiétante. La production mondiale d'anguilles est passée de plus de 50 000 tonnes dans les années 1980 à environ 3 200 tonnes en 2007 (Farrugio & Elie, 2007 ; FAO, 2014). En Méditerranée, la baisse est encore plus marquée, avec une chute des captures de 5 000 à 700 tonnes par an. En Algérie, la région d'El Kala a vu sa production décliner de 80 tonnes par an à moins de 20 tonnes au début des années 2000 (Kara, 2012).

Parmi les causes identifiées, les perturbations océaniques dans la mer des Sargasses (Castonguay et al., 1994 ; Friedland et al., 2007 ; Bonhommeau et al., 2008), la surexploitation des stades juvéniles (Prouzet, 2003 ; Farrugio & Elie, 2010), la pollution (Chetto et al., 2001 ; Azeroual, 2010), ainsi que les effets pathogènes de *A. crassus* (Lefebvre et al., 2004 ; Kennedy, 2007 ; Palstra et al., 2007) sont régulièrement évoqués.

Dans ce contexte, cette thèse propose une approche intégrée pour évaluer l'état écologique du lac Tonga et de l'estuaire du Mafragh, à travers une analyse multifactorielle portant sur la biologie, le régime alimentaire, le parasitisme, et la contamination métallique chez *Anguilla anguilla*. Ce travail vise à éclairer les mécanismes du déclin local des anguilles et à contribuer à la définition de mesures de gestion adaptées à ces milieux.

### ✓ Objectifs de la thèse :

L'objectif central de ce travail de recherche est d'évaluer l'état de santé écologique du lac Tonga et de l'estuaire du Mafragh en s'appuyant sur une étude intégrée de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), à travers une approche croisée mêlant analyses parasitologiques, biochimiques et écologiques. Cette démarche s'organise autour de quatre axes majeurs :

- **Structure de la sous population d'anguille étudiée (croissance et argenture) :**  
L'examen de la croissance corporelle et des stades d'argenture permettra de mieux cerner la dynamique démographique des populations d'anguilles dans les deux milieux étudiés. Les variations de taille, de poids, estimation de l'âge par otholitométrie et de maturité sexuelle feront l'objet d'une attention particulière afin d'évaluer l'état physiologique des individus et leur potentiel migratoire. Cette analyse s'inscrit dans le prolongement de plusieurs travaux ayant mis en évidence l'influence des conditions environnementales sur la structuration des populations (Sanekli, 1981 ; Ould Daddah,



1995 ; Gargouri-Ben Abdallah, 2001; Djebbari 2012 ; Tahri, 2016 ; Derouiche, 2016).

➤ **Analyse du régime alimentaire :**

L'étude du contenu stomacal des anguilles permettra de caractériser la disponibilité et la diversité des ressources trophiques dans les deux écosystèmes, ainsi que d'évaluer les interactions écologiques entre *A. anguilla* et son environnement. Cette approche est essentielle pour identifier les éventuelles pressions alimentaires qui pourraient impacter la condition et la croissance des individus (Machta, 2001 ; Hizem, 2003 ; Djebbari 2012).

➤ **Biodiversité de la faune parasitaire (ecto et endoparasites) :**

L'analyse des infections parasitaires, tant internes qu'externes, visera à mesurer leur impact sur la santé des anguilles et leurs aptitudes à la migration. Une attention particulière sera portée au nématode *Anguillicoloides crassus*, connu pour ses effets délétères sur la vessie natatoire et les performances de nage. Cette étude s'appuie sur des recherches antérieures qui ont révélé des taux d'infestation préoccupants (Loucif et al., 2009 ; Tahri, 2016 ; Derouiche, 2016 ; Lefebvre et al., 2011 ; Fazio et al., 2012 ; Djebbari et al., 2018).

➤ **Contamination et bioaccumulation métallique :**

La quantification des métaux lourds dans les tissus musculaires et hépatiques des anguilles vise à évaluer le niveau de pollution chimique de ces milieux. Des contaminants persistants comme le plomb ou le cadmium peuvent induire des effets toxiques non seulement sur la biologie des anguilles, mais également sur l'ensemble du réseau trophique (Bruslé, 1994 ; Tapie et al., 2011). Ce volet contribuera à approfondir la compréhension des impacts environnementaux liés à la contamination métallique dans les écosystèmes aquatiques algériens. En complément, une attention particulière sera portée à l'interaction entre parasitisme et bioaccumulation métallique, afin de déterminer dans quelle mesure la présence de parasites influence la rétention ou la mobilisation des métaux lourds chez l'anguille. Cette dimension permet d'explorer les liens potentiels entre stress parasitaire et charge toxique, et d'affiner ainsi l'évaluation globale de la qualité écologique des milieux étudiés.



Pour finir, cette étude ambitionne de fournir un socle de données rigoureuses permettant de mieux cerner les pressions écologiques pesant sur les anguilles et les milieux qu'elles colonisent. Les résultats générés contribueront à orienter des stratégies de gestion durable et de conservation ciblées pour les populations d'anguilles et les écosystèmes aquatiques d'Algérie. Par ailleurs, cette recherche s'inscrit pleinement dans une dynamique internationale de préservation de l'anguille européenne, espèce bioindicatrice dont le déclin symbolise les enjeux écologiques globaux affectant les milieux aquatiques continentaux et côtiers.



## 1. Présentation de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*)

L'anguille européenne : *Anguilla anguilla*, (Linnaeus 1758) est un poisson téléostéen appartenant à la famille des Anguillidae et l'une des cinq espèces d'anguilles que l'on trouve en Europe, les régions tempérées et subtropicales (Ege, 1939). C'est le seul grand migrateur amphihalien et thalassotoque européen. C'est une espèce panmictique (Schmidt, 1922) et semelpare (Fontaine *et al.* 1982). Les anguilles sont des espèces opportunistes et ubiquistes. En effet, elles sont capables d'exploiter et de s'adapter à tous les habitats aquatiques accessibles (Helfman *et al.* 1987 ; Jellyman, 1989 ; Moriarty et Dekker, 1997).

Actuellement, l'anguille européenne présente la systématique suivante :

**Embranchement** : Vertébrés

**Super-classe** : Actinoptérygiens

**Classe** : Ostéichthyens

**Sous-classe** : Apodes

**Ordre** : Anguilliformes

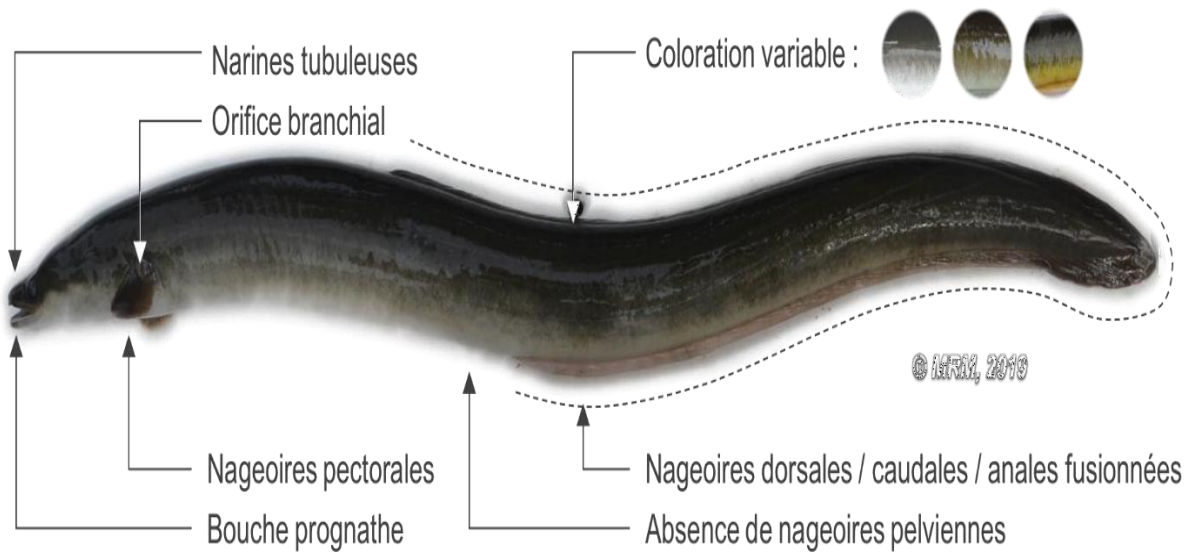
**Famille** : Anguillidae

**Genre** : *Anguilla*

**Espèce** : *A. anguilla* (Linné, 1758)

## 2. Morphologie :

L'anguille européenne présente une silhouette allongée et serpentiforme, avec un corps effilé et légèrement aplati dans sa portion postérieure (Figure 01). Sa peau, lisse et recouverte d'un mucus abondant, dissimule de très petites écailles incrustées dans l'épiderme, à peine visibles à l'œil nu. Les fentes branchiales sont peu apparentes, et les nageoires pectorales sont insérées à la fin de la tête. Comme chez les autres anguilles, les nageoires dorsale, caudale et anale sont réunies en une seule frange continue, tandis que les nageoires pelviennes sont absentes. La tête est comprimée, avec un museau dont la forme varie selon les individus. L'appareil buccal est marqué par une mâchoire inférieure proéminente, dotée de dents fines, souvent peigniformes. Les narines antérieures, en forme de tubes, sont situées à l'extrémité du museau, tandis que les yeux, de forme ronde, présentent une iris de couleur jaune pâle.



**Figure 01 :** Planche naturaliste de l'anguille européenne (<https://www.observatoire-rhonemediterranee.fr>)

La morphologie céphalique est caractérisée par une tête comprimée, un museau variant entre forme effilée et élargie, ainsi que des mâchoires et un vomer portant de petites dents en forme de peigne ou de soie. La lèvre inférieure, plus volumineuse que la supérieure, confère à l'animal un profil buccal proéminent. Les narines tubulaires antérieures se situent à proximité du bout du museau, et les yeux, circulaires, arborent une iris de teinte jaunâtre.

Sur le plan phylogénétique, *A. anguilla* appartient au superordre Elopomorpha, un lignage ancien de poissons osseux, considéré comme monophylétique (Inoue et al., 2010). Ce groupe est notamment marqué par des formes larvaires singulières — les leptocéphales — dont la morphologie à tête fine et la capacité d'isotonie avec l'environnement marin sont interprétées comme des adaptations évolutives primordiales facilitant la dispersion marine (Hulet et Robins, 1989). L'absence de cellules à chlorure branchiales fonctionnelles chez les leptocéphales à des stades précoces du développement (Kaneko et al., 2003 ; Sasai et al., 2007) renforce l'hypothèse selon laquelle la régulation osmotique est un caractère dérivé acquis secondairement.

La taxinomie du genre *Anguilla*, initialement fondée sur des critères morphologiques tels que la structure de la mâchoire supérieure, la pigmentation cutanée (marbrée ou lisse) et la longueur relative de la nageoire dorsale (Ege, 1939), a été substantiellement revisitée grâce aux apports de la biologie moléculaire. L'analyse de l'ADN mitochondrial a permis de préciser cette classification, conduisant à la reconnaissance de quinze espèces distinctes au sein du genre (Dijkstra et Jellyman, 1999 ; Aoyama, 2003 ; Tesch, 2003 ; Watanabe, 2005).



### 3. Aires de répartition :

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) se distingue par une aire de distribution exceptionnellement vaste, structurée en deux grandes régions, étroitement liées à son comportement migratoire amphihalín. Son territoire s'étend sur la majorité des façades maritimes de l'Europe et de l'Afrique du Nord, compris entre une limite méridionale située aux alentours de 30°N en Mauritanie, et une frontière septentrionale atteignant les eaux de la mer de Barents, approximativement à 72°N (Ege, 1939). La présence de l'espèce couvre également l'ensemble des bassins de la mer Méditerranée et de la mer Noire, jusqu'à une longitude de 45°E. Toutefois, Dekker (2003a) précise que la limite nord n'est pas définie par une frontière abrupte, mais plutôt par une décroissance progressive de l'abondance des populations à mesure que l'on progresse vers les hautes latitudes. Ainsi, bien que rarement observée, *A. anguilla* a été recensée dans les eaux de la mer Blanche et de la mer de Barents, avec des mentions sporadiques jusqu'à l'est de la rivière Petchora, au nord-est de la Russie (Figure 02).

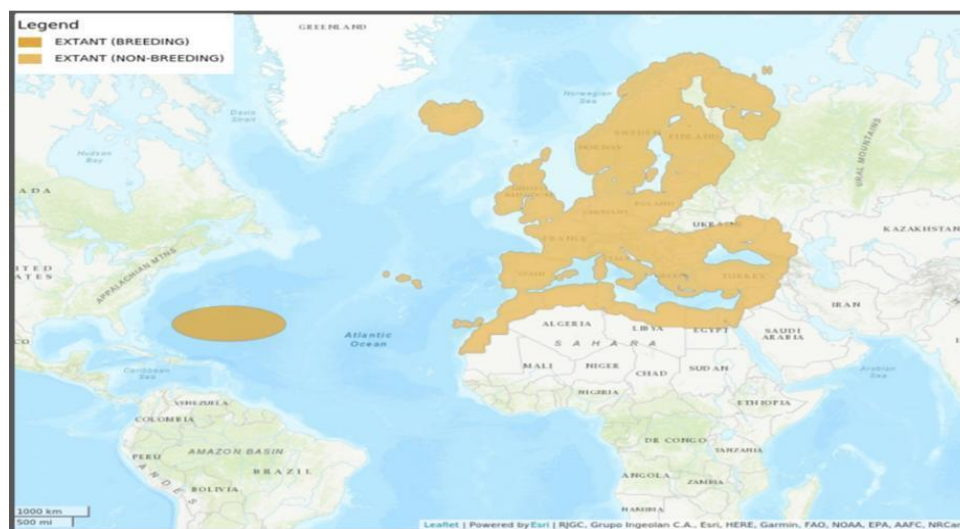


Figure 02 : Aire de distribution potentielle de l'anguille Européenne *Anguilla anguilla*

AESG (2020).

Dans la mer Noire, les populations d'anguilles sont peu denses ; néanmoins, des migrations orientées ont été observées vers le bassin du Kouban. À travers l'essor des réseaux hydrographiques anthropiques tels que les canaux, quelques individus ont même été signalés atteignant le bassin de la Volga. L'extension de l'aire vers la Scandinavie septentrionale et l'Europe de l'Est témoigne d'une certaine résilience écologique, bien qu'il soit probable que l'aire historique



de répartition de l'espèce fût plus étendue qu'actuellement (CMS, 2014). À l'opposé, la limite méridionale de la distribution semble plus nettement définie, en raison de l'absence d'habitats dulçaquicoles appropriés dans les régions désertiques du Sahara (Dekker, 2003a). Cette barrière écologique naturelle limite efficacement la progression sud de l'espèce. Par ailleurs, l'Islande présente un cas particulier : bien qu'éloignée des principaux corridors migratoires, cette île accueille des populations d'anguilles, parmi lesquelles *A. anguilla* coexiste avec l'anguille américaine *A. rostrata*. Fait notable, une hybridation interspécifique entre ces deux espèces aurait été mise en évidence dans les populations islandaises selon Avise et al. (1990), illustrant ainsi la complexité des dynamiques évolutives au sein du genre *Anguilla*.

#### 4. Cycle de vie :

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) présente un cycle vital d'une complexité remarquable, caractéristique des espèces diadromes thalassotoques (migratrices amphihalines). Ce cycle intègre une alternance de migrations océaniques et continentales, entrecoupées par deux métamorphoses profondes. L'ensemble des espèces relevant de l'ordre des Anguilliformes est à reproduction marine, une caractéristique phylogénétiquement héritée d'un ancêtre marin (Inoue et al., 2010 ; Arai et Chino, 2012). Toutefois, parmi toutes les anguillidés, *A. anguilla* se distingue par la longueur et la complexité océanographique de ses migrations transatlantiques (Bertin, 1951 ; Deelder, 1985 ; Tsukamoto et al., 2002). Son cycle biologique peut ainsi être schématisé en une succession de deux transformations morphologiques majeures séparées par une phase continentale de croissance prolongée, culminant en une unique période reproductive terminale.

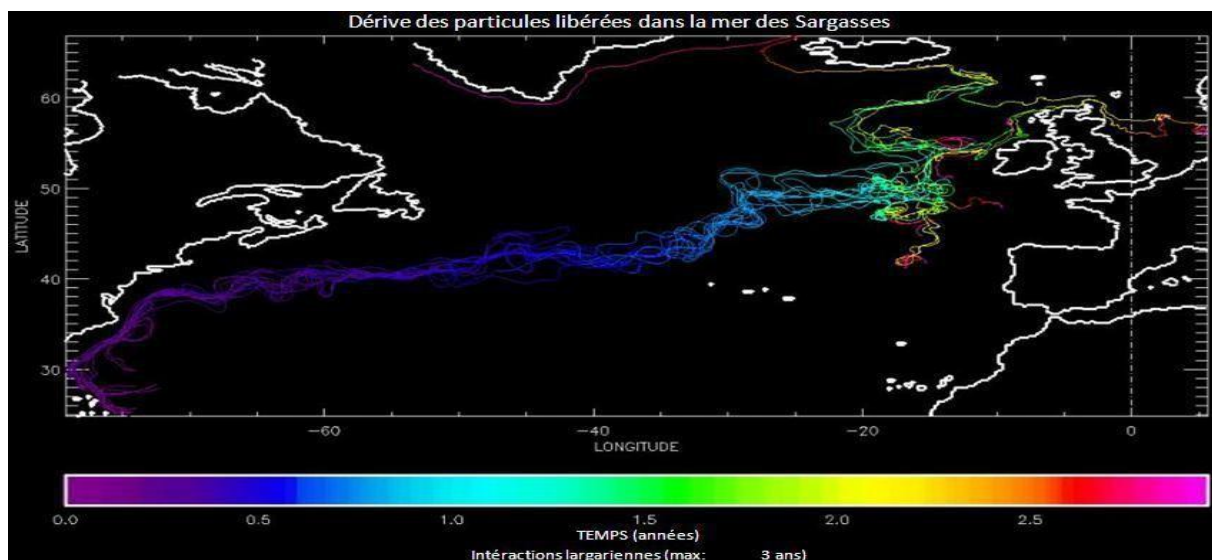
##### 4.1. Phase de migration transatlantique : Stade larvaire (Leptocéphale)

Les connaissances sur le développement embryonnaire des anguilles restent limitées ; jusqu'à présent, aucun œuf n'a été collecté en milieu naturel. L'éclosion génère des larves connues sous le nom de leptocéphales. Selon McCleave et al. (1987), ces leptocéphales mesurent moins de 10 mm à l'émergence. Leurs corps, transparents et foliacés, sont comprimés latéralement, se terminant par une extrémité arrondie ou effilée. La tête est particulièrement réduite par rapport au reste du corps (Bertin, 1951 ; Lecomte-Finiger et al., 2004) (Figure 03).



**Figure 03 :** Larve leptocéphale d'anguille européenne ([www.bateaux.com](http://www.bateaux.com)).

Ces larves, au mode de vie strictement planctonique, se nourriraient principalement de « neige marine », une matière organique particulaire en suspension, durant leur traversée transocéanique (Bertin, 1951 ; Otake et al., 1993). Bien que les mécanismes exacts de leur transport vers les côtes européennes et nord-africaines demeurent partiellement élucidés, il est généralement admis qu'ils sont acheminés par le courant nord-équatorial, puis captés par le Gulf Stream et la Dérive Nord-Atlantique (Schmidt, 1909 ; Bertin, 1951). Cette migration, jusqu'aux marges du plateau continental, s'étend sur une durée moyenne de deux ans (Bonhommeau et al., 2010 ; Zenimoto et al., 2011), (Figure 04) bien que Schmidt l'ait initialement estimée entre 2,5 et 3 ans.



**Figure 04 :** Estimation de la durée de la migration transatlantique des larves leptocéphales vers le plateau continental (d'après Bonhommeau et al., 2010, modifié).



#### 4.2. Phase de la première métamorphose et migration anadrome : Stade civelle

À l'approche du plateau continental, les leptocéphales subissent une profonde métamorphose les transformant en civelles : de jeunes anguilles transparentes, fusiformes et allongées (Schmidt, 1909 ; Powles et Warlen, 2001) (Figure 05). Cette transformation morphologique et physiologique majeure s'accompagne d'une réduction de la taille corporelle (Schmidt, 1909b ; Tesch, 2003), du développement de l'intestin (Vilter, 1945), d'une adaptation osmotique accrue (Ciccotti et al., 1993 ; Wilson et al., 2004) et de modifications endocriniennes profondes (Jegstrup et Rosenkilde, 2003). Durant cette phase critique, les larves et post-larves cessent toute alimentation jusqu'à leur arrivée dans les milieux estuariens ou dulçaquicoles (Elie, 1979 ; Elie et al., 1982 ; Elie et Rochard, 1994). L'apparition progressive de la mélanogénèse, avec la pigmentation initiale de la peau, marque la fin de la métamorphose (Elie, 1979 ; Elie et al., 1982). Les civelles atteignent alors des tailles avoisinant les 100 mm. Le recrutement sur le littoral atlantique se concentre principalement durant les mois de janvier et février (Elie et Rochard, 1994), tandis qu'en mer du Nord et dans l'est de la Méditerranée, l'arrivée est plus tardive (Bertin, 1951 ; Elie, 1979 ; Feunteun et al., 1991).



**Figure 05** : Civelles d'anguille européenne *Anguilla anguilla* capturées à l'Oued Messida  
(Présent travail)

Les civelles colonisent les estuaires en utilisant la marée montante pour progresser passivement (Elie, 1979 ; McCleave et Kleckner, 1982 ; Gascuel, 1986). À l'approche du printemps, elles adoptent un comportement de nage active dirigée vers l'amont, venant compléter leur transport passif. Au cours des trois premières années suivant leur arrivée, les civelles investissent progressivement les systèmes fluviaux, s'éloignant des zones de marée pour explorer des habitats de plus en plus continentaux (Elie, com. pers.).



Ce mouvement est guidé par des phénomènes de tropisme : l'hydrotropisme (attraction pour l'eau douce) et le rhéotropisme positif (orientation contre le courant) (Edeline et al., 2005 ; Imbert et al., 2010). La détection de médiateurs chimiques d'origine dulçaquicole joue également un rôle clé dans cette orientation (McCleave et Kleckner, 1982 ; Sorensen, 1986 ; Sola et Tongiorgi, 1996). Les civelles investissent une grande variété d'habitats : fleuves, rivières, estuaires, marais, lagunes, lacs, voire prairies littorales à herbiers (Elie, 1999). Celles pénétrant en eau douce subissent une phase de transition physiologique complexe (Ciccotti et al., 1993 ; Birrel et al., 2000), amorçant une reprise alimentaire progressive (Elie et al., 1982 ; Bardonnet et Riera, 2005). Ce processus est associé à une augmentation de la pigmentation corporelle et à la croissance jusqu'au stade d'anguillettes mesurant environ 9 à 10 cm de longueur (Elie, 1979 ; Elie et al., 1982). La durée de cette phase de transition est fortement conditionnée par les paramètres environnementaux, notamment la température et la salinité, et peut varier de quelques jours à plusieurs mois (Edeline et al., 2005 ; Briand et al., 2005).

#### 4.3. Phase de sédentarisation et croissance : Stade anguille jaune

Après leur installation progressive dans les cours d'eau, les jeunes anguilles, appelées anguillettes, développent un métabolisme orienté essentiellement vers la croissance. Elles adoptent un comportement nocturne et benthique, caractérisé par un régime alimentaire carnivore et opportuniste (Lecomte-Finiger, 1985 ; Richards, 1987). Avec leur croissance, elles prennent l'apparence typique de l'anguille jaune, marquée par une coloration brun-vert dorsale et des flancs à dominante jaune (Figure 06b et 06c).



**Figure 06 :** Anguille Européenne à différents stades : argenté (a) ; jaune (b et c).

(Derouiche, E ; 2016)



Durant cette phase, certaines anguilles jaunes se montrent relativement sédentaires, maintenant leur présence dans des habitats d'eau douce ou saumâtre, tandis que d'autres manifestent un comportement nomade, se déplaçant entre différents milieux en fonction de la disponibilité trophique. Elles se nourrissent alors d'une grande variété de proies : poissons, crustacés, bivalves et vers polychètes (Daverat et al., 2004 ; van Ginneken et Maes, 2005). Ce nomadisme, cependant, demeure transitoire et s'étend généralement sur moins de trois ans (Daverat et al., 2004). La durée de la phase de croissance est très variable, allant de 3 à 20 ans, selon des facteurs tels que les conditions écologiques locales, la disponibilité alimentaire, le sexe final, la qualité de l'habitat d'origine et l'accessibilité à des habitats futurs adéquats (van Ginneken et Maes, 2005). En règle générale, les milieux lagunaires et estuariens, plus riches en ressources trophiques, favorisent une croissance plus rapide par rapport aux eaux douces (Morrisson et Secor, 2003 ; Edeline et Elie, 2004 ; Daverat et al., 2012). Toutefois, les individus ayant grandi en eau douce atteignent des tailles supérieures, ce qui semble être un avantage pour la qualité génétique des futurs géniteurs (Durif et al., 2009b).

#### **4.4. Phase de la deuxième métamorphose et préparation à la migration catadrome : Stade anguille argentée**

Une fois la croissance achevée et les réserves énergétiques suffisantes accumulées, les anguilles jaunes entreprennent leur transformation en anguilles argentées, se préparant ainsi à leur migration de reproduction vers la mer des Sargasses (Bertin, 1951 ; Tesch, 1977). Cette ultime métamorphose, dénommée argenture, anticipe la migration en induisant d'importantes transformations morphologiques et physiologiques (Fontaine, 1994).

Cette deuxième métamorphose se caractérise par des modifications morphologiques et physiologiques :

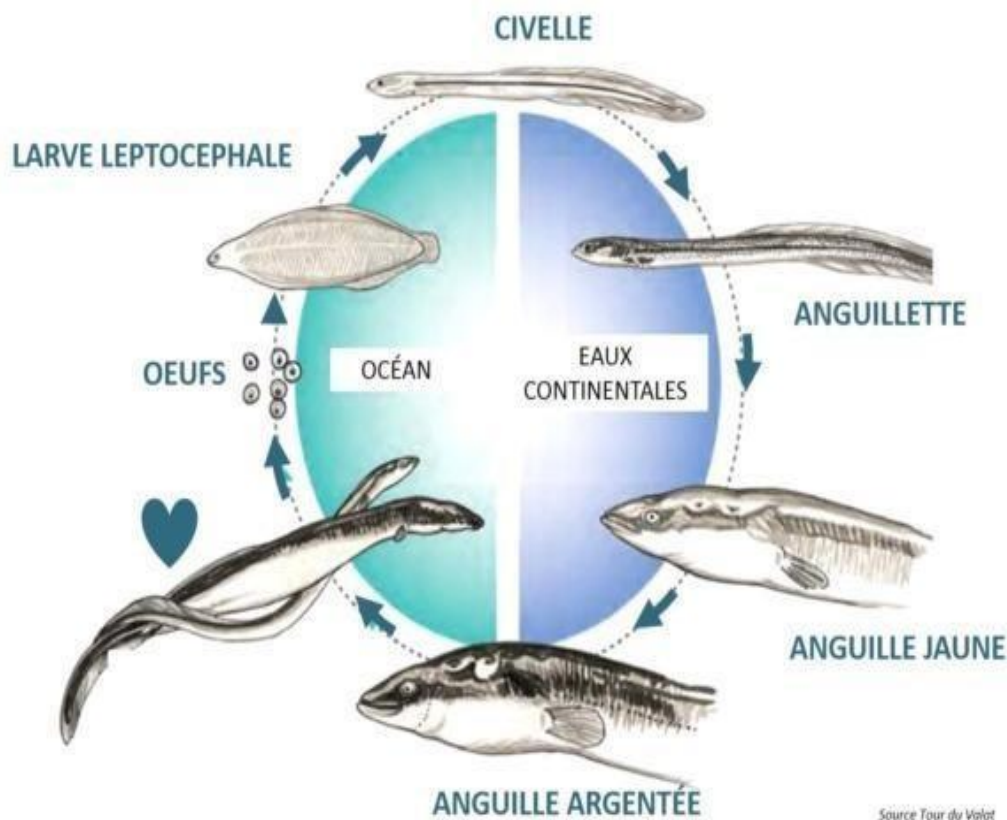
- **Changement de la coloration corporelle** : le ventre devient blanc-argenté, tandis que les flancs et le dos adoptent une teinte bronze à noire, adaptation jugée favorable à la vie pélagique (Denton et Nicol, 1966 ; Durif et al., 2009a) (Figure 06 a).
- **Développement de la ligne latérale** : celle-ci devient plus visible et sensible, facilitant la détection des courants et des obstacles (Zacchei et Tavolaro, 1988).
- **Allongement et noircissement des nageoires pectorales**, optimisant la propulsion.



- **Augmentation du diamètre oculaire**, accompagnée d'une réduction des cônes et d'une multiplication des bâtonnets pour favoriser la vision en milieu sombre (Bertin, 1951 ; Pankhurst, 1982b ; Es-Souni et Ali, 1987).
- **Épaississement de la peau**, augmentation des cellules à mucus, agrandissement et chevauchement des écailles (Saglio et al., 1988 ; Pankhurst, 1982a).
- **Hypertrophie musculaire** : la masse musculaire passe de 7 % à 14 % du poids corporel (Pankhurst, 1982c).
- **Stockage massif de lipides**, essentiels tant pour la migration que pour la maturation gonadique (Lewander et al., 1974 ; Larsson et al., 1990 ; Svedäng et Wickström, 1997 ; van Ginneken et van den Thillart, 2000).
- **Réduction progressive des cellules olfactives** (Sorensen et Pankhurst, 1988).
- **Amorce de la maturation des gonades**, marquée par une élévation du rapport gonado-somatique et de l'activité hormonale (Colombo et al., 1984 ; Lecomte-Finiger, 1990 ; Durif et al., 2000). Toutefois, la maturation complète n'intervient que durant la migration sous l'effet de la pression hydrostatique (Dufour et Fontaine, 1985).
- **Atrophie du système digestif**, avec raccourcissement de l'intestin et arrêt de l'alimentation (Pankhurst et Sorensen, 1984 ; Bertin, 1951 ; Durif et al., 2000).
- **Adaptation de la vessie gazeuse** : augmentation du diamètre et de la longueur des capillaires du rete mirabile, facilitant la régulation de la flottabilité (Yamada et al., 2001 ; Lecomte-Finiger, 1990).

Le départ en migration (ou dévalaison) semble modulé par des facteurs environnementaux tels que les cycles lunaires, les fortes précipitations et certaines conditions atmosphériques particulières (Todd, 1981 ; Durif et Elie, 2008). De plus, l'âge de départ et la maturité sexuelle dépendent largement de la latitude, de la température du milieu d'élevage, des obstacles rencontrés, du taux de croissance individuel et du sexe (Vøllestad, 1992 ; van Ginneken et al., 2007).

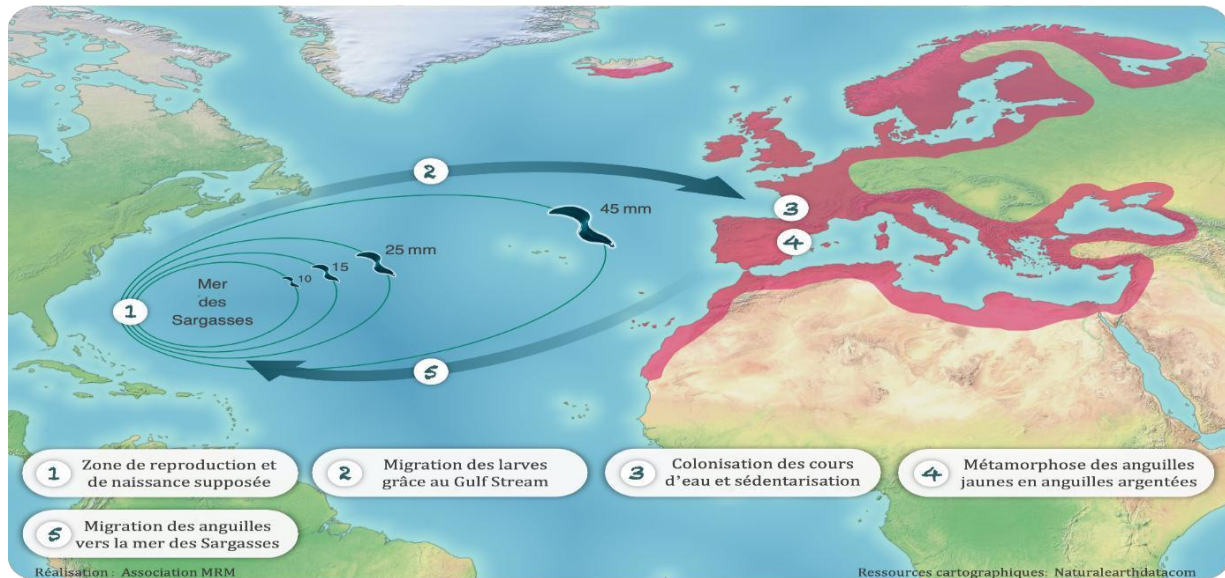
Une fois engagées, les anguilles argentées doivent parcourir environ 6000 kilomètres pour atteindre leur aire de reproduction. Ce trajet peut nécessiter jusqu'à six mois de nage continue (Kettle et al., 2011). Pendant leur périple, elles exploitent les courants des Canaries et des Açores et réalisent des migrations verticales quotidiennes (Castonguay et McCleave, 1987 ; Åarestrup et al., 2009). (Figure 07)



**Figure 07 :** Cycle biologique de l’anguille européenne *Anguilla anguilla*  
(Alain et Coralie, 2013)

#### 4.5. Phase de reproduction

L'anguille européenne demeure une énigme pour la communauté scientifique, principalement en raison de la méconnaissance des étapes marines de son cycle de vie, notamment la migration et la reproduction, faisant de cette espèce l'un des derniers mystères de la biologie moderne. Les informations précises sur les sites exacts de frai restent partielles. Cependant, les travaux de [Johannes Schmidt en 1922](#) ont fourni la première explication. En fait, il a été conclu que le frai a lieu dans la zone ovale d'environ 2000 km de large, la mer des Sargasses, dans l'Atlantique centre-ouest (à environ 26°N 60°W) ([Figure 08](#)). Ces travaux ont été confirmés par la suite par [Schmidt lui-même \(1923, 1925 et 1935\)](#) ainsi que par d'autres auteurs ([Tesch 1982 ; Schoth et Tesch 1982 ; Boëtius et Harding, 1985 ; Wippelhauser \*et al.\*, 1985 ; Kleckner et McCleave, 1985 ; McCleave \*et al.\*, 1987 ; Castonguay et McCleave 1987 ; McCleave et Kleckner 1987 ; Kleckner et McCleave 1988 ; Tesch et Wegner 1990](#))



**Figure 08 :** Aire de répartition de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L., 1758), adaptée de Germain (1927) pour l'aire continentale et Schmidt (1924) pour la répartition océanique des larves. (<https://www.observatoire-rhonemediterranee.fr>)

Il est également important de noter que l'anguille américaine (*Anguilla rostrata*) fraie dans une zone sympatrique de la mer des Sargasses (McCleave et al., 1987). Toutefois, bien que fortement présumée, la ponte des anguilles dans la mer des Sargasses n'a jamais été directement observée (Fazio, 2009). De surcroît, les routes migratoires précises et les conditions environnementales entourant le frai des adultes demeurent encore largement inconnues (Harden Jones, 1968 ; van Ginneken et Maes, 2005).

Des études moléculaires récentes ont remis en question le modèle traditionnel de reproduction panmictique, suggérant l'existence potentielle de plusieurs zones de frai distinctes (Daemen et al., 2001 ; Wirth et Bernatchez, 2001 ; Maes et Volckaert, 2002). La panmixie, définie comme une reproduction aléatoire sans différenciation génétique à l'échelle de l'espèce (Côté, 2014), implique que les individus se retrouvent dans une aire unique et que la fécondation se fait sans barrières structurelles.

Cependant, selon Wirth et Bernatchez (2001) et Maes et Volckaert (2002), l'analyse de l'ADN nucléaire révèle une structuration génétique chez *Anguilla anguilla*, avec des différenciations claires entre un groupe méditerranéen, un groupe mer du Nord et un groupe Atlantique.



Cette découverte suggère l'existence de décalages temporels dans l'arrivée des géniteurs issus de différentes zones, ce qui pourrait partiellement expliquer les différences observées tout en admettant l'existence potentielle d'une unique aire de frai.

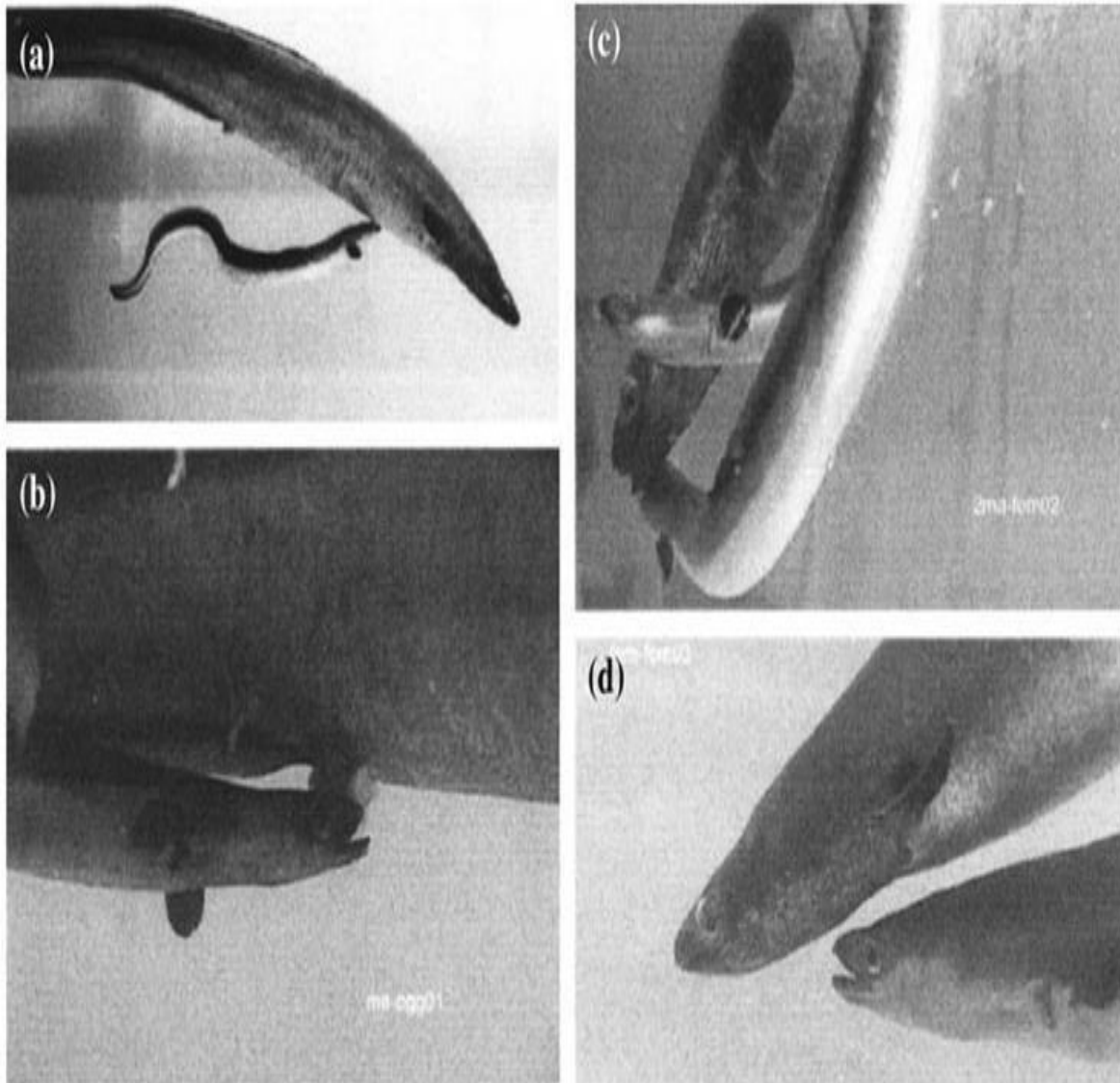
Bien que de nombreuses incertitudes persistent, il est largement admis qu'une fois arrivées dans la mer des Sargasses, les anguilles fraient et meurent d'épuisement (Tesch, 2003).

En raison de l'impossibilité d'observer la reproduction naturelle, les connaissances actuelles proviennent principalement d'études en laboratoire utilisant l'induction hormonale (Fontaine, 1936 ; Fontaine et al., 1964 ; Boëtius I et Boëtius J, 1967 ; Epler et Bieniarz, 1978 ; van Ginneken et al., 2005b).

Selon van Ginneken et collaborateurs (2005b), le comportement reproducteur des anguilles est collectif, massif et simultané. La parade nuptiale observée en conditions expérimentales se déroule selon le schéma suivant (Figure 09) :

- Les mâles stimulent les femelles au niveau de la tête.
- Les mâles sont ensuite attirés par la région uro-génitale de la femelle.
- Plusieurs mâles encerclent une même femelle pour libérer simultanément leurs spermatozoïdes.
- Aucun soin n'est apporté aux œufs pélagiques relâchés dans la colonne d'eau.

Cet unique événement reproductif marquerait la fin du cycle de vie de l'anguille européenne. Toutefois, de nombreuses questions restent en suspens quant à la dynamique réelle du frai en milieu naturel. Les récents progrès technologiques, notamment les balises satellites archives "pop-up", offrent de nouveaux moyens d'explorer ces étapes critiques.



Spawning behaviour of artificially matured European eel (*Anguilla anguilla* L.). Two females were used, together with successively 3 trios of males to record their spawning behaviour in the 4000-liter aquarium: (a) Male stimulates female at the head region, (b) Male attracted by

the urogenital region of the female, (c) Mass spawning, several males with one female with release of sperm, (d) Interaction between females. Two females chasing each other. Induced spawning behaviour of eels was massive and simultaneous. (van Ginneken et al. 2005d)

**Figure 09** : Reproduction d'anguille européenne *Anguilla anguilla* en condition artificielle (Fazio, 2009).



## 5. Dimorphisme sexuel de l'anguille :

La différenciation sexuelle chez *Anguilla anguilla* débute au stade jaune sédentaire, rendant possible l'observation d'un dimorphisme sexuel (Bertin, 1951 ; Kushnirov et Degani, 1995). Les femelles atteignent l'argenture à des tailles et âges plus élevés que les mâles, lesquels présentent un turnover plus rapide. Ce phénomène est également décrit chez l'anguille américaine *Anguilla rostrata* (Helfman et al., 1984). Les mâles semblent adopter une stratégie de minimisation du temps de croissance ("time-minimizing"), amorçant leur argenture précocement, tandis que les femelles privilégient l'accumulation de réserves énergétiques destinées au développement gonadique et à la migration (Derouiche, 2016). Cette stratégie est corrélée au fait que la fécondité des femelles augmente proportionnellement à leur taille corporelle (Sinha et Jones, 1967 ; Vøllestad et Jonsson, 1988 ; Vøllestad, 1992 ; Svedäng et Wickström, 1997 ; Durif et al., 2005). Les durées estimées de la croissance continentale varient : entre 3 et 8 ans pour les mâles et entre 4 et 5 ans pour les femelles dans les cas inférieurs ; tandis que les estimations supérieures atteignent 12 à 15 ans pour les mâles et 18 à 20 ans pour les femelles (Adam, 1997 ; Acou et al., 2008 ; Froese et Pauly, 2015 ; Durif et al., 2009b).

Toutefois, il existe encore de nombreuses lacunes, notamment pour les populations situées au sud du bassin méditerranéen. Aucun seuil de taille ou d'âge n'a été déterminé pour déclencher la transformation en anguille argentée (Derouiche, 2016), et les facteurs déclencheurs de ce processus restent partiellement inconnus (Svedäng et al., 1996 ; Durif, 2003 ; Durif et al., 2009a).

D'autre part, les mâles amorcent généralement leur migration vers la mer des Sargasses dès le mois d'août, tandis que les femelles suivent un à deux mois plus tard, en septembre-octobre (Usui, 1991 ; Durif et al., 2009a). Cette différence de synchronisation serait due à la taille plus modeste des mâles, impliquant une vitesse de nage inférieure. Selon des estimations basées sur une vitesse de croisière de 1 BL/s, les mâles mettraient environ 174 jours pour atteindre la zone de frai, contre seulement 139 jours pour les femelles (van Ginneken et Maes, 2005).

Les mécanismes du déterminisme sexuel après la phase hermaphrodite initiale restent également mal compris (Tesch, 1977). Toutefois, plusieurs études montrent que des facteurs environnementaux, tels que la densité de population, la disponibilité des ressources et le stress social, favorisent l'émergence de mâles dans les zones de forte densité (Passakas et Tesch, 1980 ; Davey et Jellyman, 2005).



De surcroît, il est suggéré que les femelles ont tendance à migrer vers l'amont, échappant ainsi à la compétition intense qui favorise la survie des mâles plus petits (Sinha et Jones, 1975 ; Vøllestad et Jonsson, 1988 ; Chu et al., 2006). Cette ségrégation sexuelle selon un gradient aval-amont a été observée dans plusieurs bassins fluviaux (Bertin, 1951 ; Edeline et Elie, 2004).

Enfin, l'anguille présente une capacité remarquable à survivre hors de l'eau, grâce à une épaisse couche de mucus et à une cavité branchiale protégée, lui permettant une respiration cutanée pouvant satisfaire jusqu'à 35 % de ses besoins en oxygène (Gilles et al., 2006). Durant la migration transocéanique, les anguilles argentées occupent principalement les couches épipélagiques et mésopélagiques, atteignant parfois des profondeurs allant jusqu'à 1000 mètres (Årestrup et al., 2009).

## 6. Caractéristiques bioécologiques :

### 6.1 Milieux de vie et habitats :

Lors de sa première migration transocéanique, le leptocéphale de l'anguille européenne évolue dans les zones épipélagiques et mésopélagiques, jusqu'à 300 mètres de profondeur (Castonguay et McCleave, 1987). Au cours de sa phase continentale, *Anguilla anguilla* occupe une diversité remarquable d'habitats : petits cours d'eau, étangs, réservoirs, grands fleuves, lacs, estuaires, lagunes, et zones côtières (Elie, 1999).

Cette plasticité écologique permet de considérer l'espèce comme anadrome facultative, dans la mesure où la migration vers l'eau douce n'est pas indispensable pour la totalité des individus. Certains spécimens réalisent leur cycle biologique entier en milieu estuarien ou lagunaire (Tsukamoto et al., 1998 ; Daverat et al., 2004, 2006 ; Wickström et Westerberg, 2006).

La large distribution géographique de l'espèce, depuis les régions subtropicales jusqu'au cercle arctique, témoigne de sa grande valence écologique (Deelder, 1985). Ses préférences thermiques s'étendent de 10°C à 38°C, avec une température optimale située entre 22°C et 23°C (Boëtius et Boëtius, 1967 ; Elie, 1979 ; Sadler, 1979).

L'anguille jaune adopte un mode de vie benthique, se cachant entre les pierres, les racines et les crevasses du substrat. Elle se déplace sur les fonds des cours et plans d'eau et possède la capacité de ramper ou de s'enfouir dans des substrats meubles (Baisez, 2001). Son habitat peut varier largement selon la profondeur, la couverture végétale, la granulométrie et la vitesse du courant.



## 6.2 Régime alimentaire :

Au stade larvaire, le régime alimentaire de l'anguille européenne est principalement zooplanctophage. Les leptocephales consomment des particules organiques en suspension, communément appelées « neige marine » (Bertin, 1951 ; Otake et al., 1993 ; Desaunay et Guerrault, 1997).

Durant la première métamorphose, l'anguille cesse de s'alimenter, son tube digestif étant temporairement fermé par des systèmes d'occlusion (Monein-Langle, 1985). L'alimentation reprend environ 1 à 1,5 mois plus tard, lorsque l'individu atteint le stade de civelle pigmentée (Elie, 1979 ; Elie et al., 1982).

Progressivement, les civelles passent de la consommation de proies planctoniques à des proies benthiques plus grandes telles que les larves d'insectes, les vers de vase et les petits crustacés, utilisant principalement leur odorat pour localiser leurs proies (Crnjar et al., 1992).

Durant la phase de croissance, l'anguille jaune manifeste un opportunisme alimentaire extrême. Elle est capable d'ingérer presque tout organisme vivant ou récemment mort, parfois jusqu'à 25 % de son poids corporel (Bruslé et Quignard, 2001). Son régime benthique est varié : isopodes, amphipodes, crustacés, annélides, mollusques, insectes et petits poissons. Des cas isolés de cannibalisme ont été documentés, bien qu'ils soient rares en milieu naturel (Elie, 1994).

L'activité alimentaire est principalement nocturne. Certaines anguilles adoptent des techniques de chasse à l'affût, dissimulées dans la vase ou le sable, ne laissant dépasser que leurs yeux et leur museau, prêtes à capturer toute proie à proximité en projetant rapidement leur corps hors du substrat (Derouiche, 2016) (Figure 10).

Le comportement alimentaire est fortement influencé par la température : il diminue au-dessus de 28–30°C et cesse en dessous de 6–10°C (Elie et Daguzan, 1976 ; Elie, 1979). Ainsi, les anguilles du nord de l'Europe jeûnent durant l'hiver, tandis que celles du sud entrent en léthargie alimentaire en été (Bruslé et Quignard, 2001).



**Figure 10 :** Anguilles jaunes enfouies dans le sable (Musée Dar el Hout, INSTM Salammbô  
(Derouiche E, 2016)

Lors de la migration de reproduction, les anguilles argentées cessent complètement de s'alimenter en raison de la régression de leur tube digestif (Durif et al., 2000). Elles doivent alors puiser exclusivement dans leurs réserves lipidiques accumulées dans le foie et les muscles (Larsson et Lewander, 1973 ; Larsson et al., 1990 ; van Ginneken and van den Thillart, 2000).

### 7 Importance économique :

*Anguilla anguilla* représente une ressource halieutique de grande valeur économique, jouant un rôle clé dans les revenus des pêcheurs professionnels ainsi que dans l'industrie de la pêche en général. Outre son exploitation locale, cette espèce est également largement commercialisée et exportée vers diverses régions du monde. L'ensemble des phases continentales du cycle de vie de l'anguille est valorisé par les pêcheries commerciales (Farrugio et Elie, 2010).

D'après Crook (2010), l'anguille européenne figure parmi les quatre espèces du genre *Anguilla* ayant la plus forte importance économique à l'échelle mondiale, aux côtés de *A. rostrata* (anguille américaine), *A. japonica* (anguille japonaise) et *A. australis* (anguille à nageoires courtes). Ces espèces sont principalement exploitées pour l'alimentation humaine, bien que les préférences culinaires varient considérablement d'une culture à l'autre.



Par exemple, au Japon, les anguilles argentées sont traditionnellement grillées et marinées sous la forme de kabayaki, tandis qu'en Europe, les anguilles jaunes et argentées sont plutôt consommées fumées, en matelote ou simplement grillées à l'ail (Elie, 1979 ; Elie et Fontenelle, 1982 ; Ringuet et al., 2002 ; Briand et al., 2008 ; Crook, 2010).

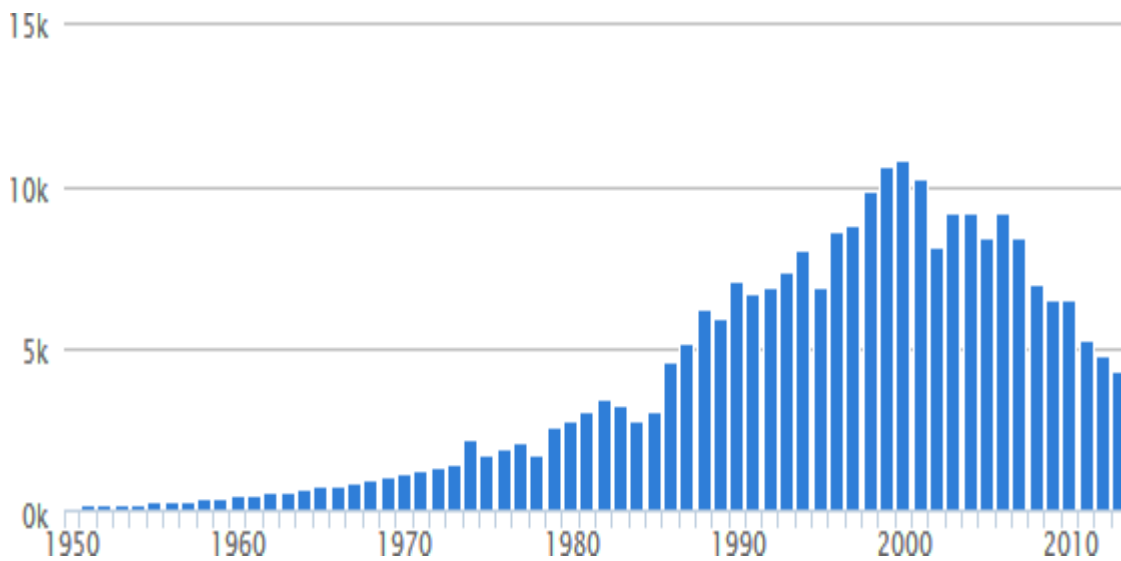
Les civelles, stade juvénile très prisé, ont historiquement constitué un mets de choix en Espagne, en France et en Italie. Leur capture est concentrée sur les côtes atlantiques du sud-ouest de l'Europe et du nord-ouest de l'Afrique, principalement en France, au Portugal, en Espagne, au Maroc et au Royaume-Uni, notamment dans la région du canal de Bristol (Elie, 1979 ; Elie et Fontenelle, 1982 ; Crook, 2010).

Les anguilles jaunes, quant à elles, sont capturées sur l'ensemble de l'aire de distribution de l'espèce, tandis que les anguilles argentées sont surtout exploitées dans les eaux plus septentrionales (Crook, 2010). Afin de compenser la pression de pêche exercée sur les populations naturelles, des programmes de repeuplement ont été mis en place, principalement en France, en Espagne et au Portugal, bien que la quantité d'alevins destinés à ce repeuplement reste modeste par rapport au volume total capturé (Dekker, 2000).

Durant les décennies précédentes, une grande partie des civelles capturées était exportée vers le Japon, puis, ultérieurement, vers la Chine. Cependant, en réponse au déclin des stocks, plusieurs pays européens ont instauré des réglementations spécifiques pour soutenir l'échappement des anguilles argentées vers la mer, conformément au Règlement Européen (EC) No. 1100/2007.

En parallèle à leur exploitation commerciale, les anguilles juvéniles sont également utilisées en aquaculture. À l'heure actuelle, plus de 90 % de la production mondiale d'anguilles provient de l'élevage (Crook, 2010). Toutefois, l'aquaculture européenne semble désormais limitée dans son développement futur, car elle reste dépendante de la capture naturelle de civelles pour l'approvisionnement des fermes aquacoles (FAO, 2015) (Figure 11).

En 2002, les Pays-Bas, l'Italie et le Danemark figuraient parmi les principaux pays producteurs, rejoints par l'Espagne, la Grèce, la Suède et l'Allemagne, ainsi que par quelques pays d'Afrique du Nord, tels que l'Algérie, le Maroc et la Macédoine (FAO, 2015). Les produits commercialisés couvrent toute une gamme : anguilles vivantes, fraîches, congelées ou préparées selon diverses recettes (Shiraishi et Crook, 2015). Parmi les exportateurs européens, la France et l'Espagne dominent le marché des civelles, tandis que le Danemark et les Pays-Bas orientent principalement leurs exportations d'anguilles jaunes et argentées vers les marchés asiatiques (Crook, 2010).



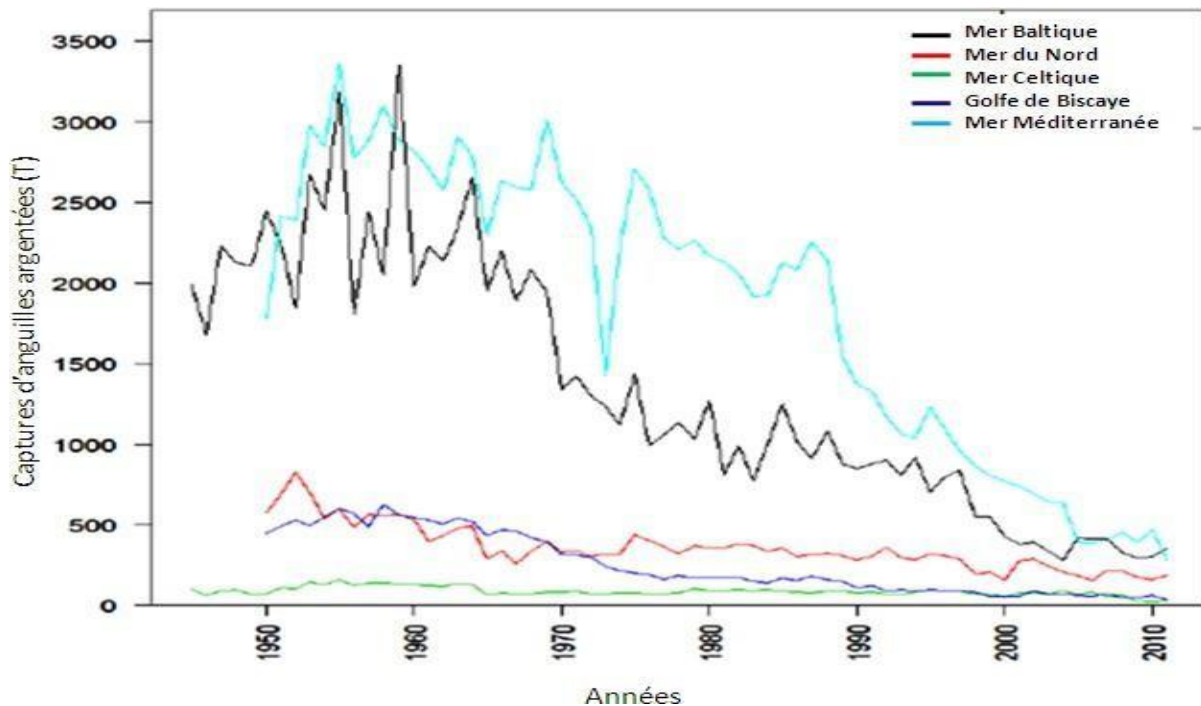
**Figure 11 :** Production mondiale en Tonne de l'anguille européenne en aquaculture (FAO, 2015).

Le prix de vente des anguilles varie sensiblement selon les saisons et les années, mais aussi selon le stade de développement de l'animal. Les civelles, particulièrement demandées, génèrent des profits nettement supérieurs à ceux obtenus avec les adultes (Ringuet et al., 2002).

Depuis l'inscription de l'anguille européenne à l'annexe II de la CITES en 2007 (application en 2009), la régulation stricte du commerce international a entraîné une chute importante des exportations vers la Chine, premier marché mondial, en raison des difficultés croissantes d'approvisionnement (Monticini, 2014).

## 8 Etat du stock :

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) est en déclin continu sur l'ensemble de son aire de répartition depuis plusieurs décennies. Les données les plus récentes indiquent que son stock a atteint un niveau historiquement bas et que la tendance reste à la baisse. Les travaux compilés par le Groupe de travail conjoint sur l'anguille (EIFAAC/ICES/GFCM) confirment une chute importante de la population et de la production dans la majorité des zones de distribution (ICES, 2014) (Figure 12).

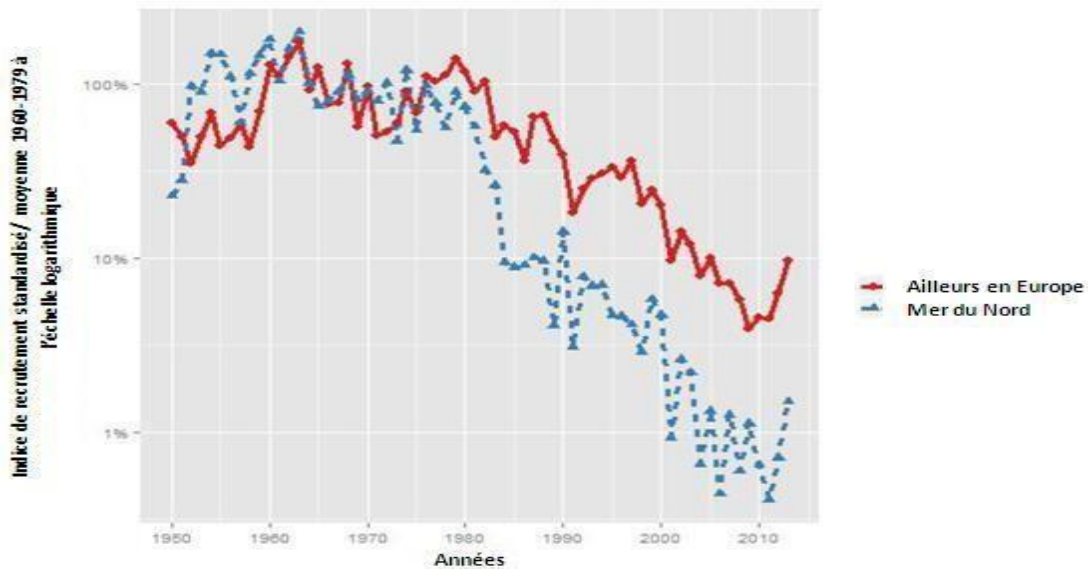


**Figure 12** : Estimations par GLM (recrutement ~ zone : année + site) des niveaux de recrutement moyen pour la civelle en Europe et en Mer du Nord (ICES WGEEL, 2013b)

Dès 1984, le Groupe National Anguille français (GNA, 1984) avait déjà tiré la sonnette d'alarme. La diminution spectaculaire de l'arrivée des civelles dans les eaux continentales européennes, amorcée au début des années 1980, est documentée par plusieurs séries chronologiques (Elie et Fontenelle, 1982 ; Dekker, 2003b). Les indices de recrutement ont atteint des niveaux historiquement bas en 2011, descendant à moins de 1 % en mer du Nord et à moins de 5 % dans le reste de l'Europe par rapport à la moyenne de 1960-1979 (ICES, 2011).

Bien qu'une légère amélioration ait été enregistrée entre 2012 et 2014, les niveaux de recrutement n'ont pas retrouvé leurs valeurs de référence (ICES, 2014) (Figure 13). En Afrique du Nord également, le recrutement a diminué de près de 50 % sur la dernière décennie (Azeroual, 2010 ; Farrugio et Elie, 2010).

De ce fait, l'anguille européenne est aujourd'hui considérée comme évoluant en dehors de ses limites biologiques de sécurité, et les pêcheries ne parviennent plus à maintenir leur niveau de production habituel (ICES, 2014). Ainsi, cette espèce est passée du statut d'« espèce nuisible » en 1984 à celui d'espèce gravement menacée (Elie et Girard, 2009).



**Figure 13 :** Indice de recrutement : moyenne de recrutement de civelles estimée pour la mer du Nord et ailleurs en Europe mis à jour pour 2013 et standardisé à la moyenne 1960-1979 (ICES, 2014)

### 9 Déclin de l’anguille européenne :

Les inquiétudes concernant le déclin du stock mondial de l'anguille européenne, *Anguilla anguilla*, ont pris une ampleur considérable en raison d'une réduction significative et persistante du recrutement à l'échelle du continent, estimée à moins de 10 % de ce qui était observé par le passé (ICES 2007). De plus, il y a eu une diminution des captures d'anguilles adultes dans de nombreuses régions (Moriarty et Dekker, 1997 ; ICES, 2001, 2002, 2004, 2006). La gravité de ce déclin a été formellement reconnue en 1998 (ICES, 1999 ; Dekker, 2003a ; Bilotta et al., 2011), conduisant à considérer les anguilles comme étant sérieusement menacées (Freyhof et Kottelat, 2010). Le débat sur les mesures à prendre pour protéger le stock mondial d'anguilles et garantir sa récupération dure depuis la fin des années 1990 (ICES, 2002). Bien qu'il subsiste des incertitudes concernant le rôle des processus océaniques (Baltazar-Soares et al., 2013 ;



Melia et al., 2013 ; Pacariz et al., 2014), le déclin du recrutement est généralement attribué à un faible stock de géniteurs (Dekker 2003b). Par conséquent, la protection et l'amélioration de la biomasse des géniteurs reproducteurs (SSB) sont considérées comme prioritaires. En 2007, l'Union européenne a émis la Régulation CE 1100/2007 (Conseil de l'Union européenne, 2007), exigeant des États membres qu'ils réduisent les taux de mortalité d'origine humaine de manière à permettre l'échappement en mer d'au moins 40 % de la biomasse des anguilles argentées par rapport à l'estimation la plus précise de l'échappement primitif, c'est-à-dire l'échappement qui aurait existé si aucune influence humaine n'avait affecté le stock.

Cependant, en raison de la complexité inhérente au cycle de vie de l'anguille, l'évaluation tant du niveau actuel limitant le recrutement de la biomasse de géniteurs (SSB) que du niveau cible requis pour restaurer le stock s'avère particulièrement ardue. Les stratégies de conservation de l'anguille européenne reposent donc principalement sur la détermination de la biomasse initiale des anguilles argentées échappant avant le déclin du stock, un paramètre complexe à estimer en raison des impacts anthropiques persistants sur la population d'anguilles. De plus, il est nécessaire de prendre en compte les niveaux actuels et futurs d'échappement selon diverses approches de gestion. À l'échelle locale, les unités de gestion sont définies par des bassins fluviaux individuels, des lacs, des lagunes ou alternativement par des districts administratifs. Elles fonctionnent de manière autonome, mais dans le cadre général de la gestion globale. Toutefois, la nature panmictique du stock d'anguilles (Andrello et al., 2011) soulève des interrogations quant à l'échelle spatiale appropriée du cadre de gestion. Bien que l'anguille européenne ne présente pas de structure génétique géographique (Als et al., 2011), elle affiche une grande flexibilité en termes de croissance corporelle, d'âge de maturité, de répartition des sexes, de comportement migratoire (Edeline et Elie 2004) et de préférences alimentaires (Edeline et al., 2005). Certaines de ces variations sont associées à de larges gradients géographiques, tels que la latitude et la longitude (Vøllestad, 1992), ainsi qu'à des facteurs environnementaux comme la densité des stocks, la température de l'eau, la disponibilité alimentaire (Tesch, 2003), la productivité (Gross, 1987) et la salinité (Tzeng et al., 1997). La pollution de l'eau, la surpêche et la fragmentation de l'habitat dans les rivières ont des impacts négatifs sur les stocks d'anguilles européennes (Dekker 2000 ; Jacoby et Gollock 2014 ; Herranz-Jusado et al. 2019).

À une échelle géographique plus étendue, les études sur le stock d'anguilles se sont principalement concentrées sur la région centrale et septentrionale de sa répartition, en



particulier dans la Baltique et la zone centrale du golfe de Gascogne. En revanche, les connaissances sont nettement moins développées concernant le stock d'anguilles dans la partie méridionale de sa répartition. Plus précisément, la mer Méditerranée se caractérise par des stocks locaux à cycle biologique court, marqué par une maturité précoce, soutenus par un recrutement sporadique d'anguilles argentées et largement confinés dans des lagunes côtières et des habitats saumâtres (Nielsen et Prouzet, 2008). Historiquement, ces conditions ont favorisé l'émergence de pêcheries d'anguilles argentées à petite échelle dans certains estuaires italiens, ainsi que l'existence de pêcheries d'anguilles stables dans de nombreuses lagunes côtières du sud de la France, d'Espagne, de Grèce, de plusieurs pays d'Afrique du Nord (Pe´rez-Ruzafa et Marcos, 2012) et dans la mer Adriatique septentrionale, notamment la valliculture dans les lagunes de Comacchio (Carrieri et al., 1992). Dans ces lagunes, des barrages de poissons permanents ont été installés le long des canaux reliant les lagunes à la mer pour exploiter la migration saisonnière des anguilles matures (Cataudella et al., 2014). Aujourd'hui, les habitats côtiers méditerranéens demeurent une composante significative de l'habitat continental global de l'anguille européenne, comptant environ 400 lagunes dans 23 pays, couvrant une superficie totale d'environ 580 000 hectares (Cataudella et al., 2014, en excluant les zones humides et les marais salants non appropriés aux anguilles). En fonction des modèles de migration des larves et du recrutement des juvéniles, on a émis l'hypothèse que la restauration du stock mondial d'anguilles pourrait dépendre en grande partie de la contribution des pays d'Europe du Sud et d'Afrique du Nord au sein du bassin méditerranéen (Dekker, 2003c ; ICES, 2007). Cette hypothèse a été sujette à des critiques (Kettle et al., 2011), cependant, une évaluation formelle de la portion méditerranéenne du stock d'Anguilla et de l'impact des pêcheries dans les lagunes reste à être effectuée.

Divers facteurs ont été impliqués dans l'effondrement de son stock :

- La surexploitation : capture de tous les stades biologiques de l'espèce (Elie et Fontenelle, 1982 ; Farrugio et Elie, 2010).
- Le changement climatique : Les changements océaniques et atmosphériques dans la mer des Sargasses peuvent affecter la survie des leptocéphales lors de leur transport par le Gulf Stream. En effet, un décalage vers le nord de l'isotherme clé (22.58C) définissant la limite nord de la zone de frai combiné aux changements dans le régime de température détectée à la fin des années 70 pourrait affecter la productivité primaire dans les zones



d'alimentation des leptocéphales. De plus, l'affaiblissement du Gulf Stream pourrait interférer avec le transport des larves induisant la baisse du recrutement des civelles, et par conséquent la baisse de l'abondance de l'anguille dans toute l'Europe (Castonguay *et al.* 1994 ; Friedland *et al.* 2007 ; Bonhommeau *et al.* 2008).

- La contamination biologique : par des organismes pathogènes comme les bactéries (Vigier, 1997 ; Esteve et Alcaide, 2009), les parasites tels que *Anguillicola crassus* qui entraîne une dégradation de la vessie natatoire et *Pseudodactylogyrus sp.* qui pourrait conduire à la mort par asphyxie (Levebre *et al.*, 2004 ; Kennedy, 2007 ; Palstra *et al.*, 2007 ; Lefebvre *et al.*, 2011 ; Fazio *et al.*, 2012) et enfin par les virus du genre Herpes et EVEX (van Ginneken *et al.*, 2004 ; van Ginneken *et al.*, 2005c ; Haenen *et al.*, 2010).
- La contamination chimique : impliquant la dégradation de la qualité des habitats (Lafaille *et al.* 2004) et l'accumulation de contaminants par les individus (PCB, HAP, OCP, métaux lourds...) (Bruslé, 1994 ; Tabouret *et al.* 2011 ; Elie et Girard, 2009 et 2014) avec des répercussions majeures sur la migration de reproduction (Palstra *et al.* 2006 ; van Ginneken *et al.* 2009), et la reproduction (Pierron *et al.* 2008a).
- La prédation : les cormorans (*Phalacrocorax carbo*) sont suspectés de consommer de grandes quantités d'anguilles contribuant ainsi à la réduction du stock (Adam, 1997 ; Knöesche, 2003 ; ICES, 2013).
- La perte des habitats par la diminution de la surface des zones humides suite à l'urbanisation croissante ou à la sécheresse (GNA, 1984 ; Chetto *et al.* 2001 ; Azeroual, 2010 ; ICES, 2012).
- L'édification d'obstacles à la migration qui conduit à la réduction de l'accessibilité des habitats et à leur fragmentation (GNA, 1984 ; Baisez, 2001), en plus de l'augmentation de la mortalité et à la réduction de l'échappement des anguilles argentées (ICES, 2008).

## 10 La contamination et la bioaccumulation métallique chez l'anguille européenne :

Le poisson en générale se distingue en tant que l'une des principales sources d'alimentation, riche en protéines essentielles et en nutriments hautement concentrés, qui sont aisément assimilables et digestibles par les êtres humains. Bien que ces protéines et nutriments essentiels



revêtent une importance cruciale pour la santé humaine, le poisson est reconnu comme une source économique de ces éléments essentiels (FAO 2008). Toutefois, les poissons, situés au sommet de la chaîne alimentaire des écosystèmes aquatiques, subissent l'impact substantiel de la pollution aux métaux lourds en provenance de diverses sources, entraînant l'accumulation de ces métaux dans leurs organismes au sein des milieux aquatiques. De ce fait, les poissons peuvent être considérés comme l'une des sources majeures de métaux préjudiciables à la santé humaine (Miao et al. 2020 ; Zerizghi et al. 2020). Cette contamination par les métaux lourds dans les poissons est reconnue comme un enjeu crucial en matière de sensibilisation et de sécurité alimentaire, les métaux lourds étant des indicateurs de premier plan de la pollution environnementale, caractérisés par leur tendance à persister longtemps dans la chaîne alimentaire (Ahmed et al. 2019).

Les activités anthropiques qui engendrent des métaux lourds et des pesticides ont un impact défavorable sur les écosystèmes aquatiques. La pollution résultante altère la qualité de l'eau et perturbe l'équilibre de ces environnements (Hussain et al. 2018). Un volume considérable d'eaux usées non traitées ou insuffisamment traitées provenant des secteurs domestiques et agricoles est déversé dans les cours d'eau, ce qui détériore la qualité de l'eau et entraîne des conséquences significativement néfastes pour les organismes aquatiques (Colin et al. 2016). Ces activités humaines génèrent des métaux lourds dans l'environnement, lesquels présentent de graves risques pour la santé humaine en raison de leur toxicité, de leur persistance, de leur dégradation abiotique et de leur accumulation dans les chaînes alimentaires (Bonanno et Giudice 2010). L'accumulation de métaux lourds à des niveaux toxiques dans l'eau, les sédiments et les organismes aquatiques provoque des dommages écologiques qui menacent la santé humaine à travers la consommation d'aliments provenant de ces écosystèmes (Bo et al. 2015 ; Götze et al. 2014).

Les anguilles européennes sont utilisées comme un indicateur biologique fiable dans l'étude de la pollution aux ML dans les écosystèmes aquatiques, car elles sont une espèce migratrice et prédatrice, notamment en raison de leur longévité et de leur mode de vie benthique (Lortholario et al. 2019 ; Pannetier et al. 2016). Elles ont été proposées comme une matrice appropriée pour la surveillance biologique des polluants environnementaux dans les eaux douces européennes, conformément à la directive-cadre 2000/60/CE sur l'eau (CE 2000 ; Belpaire et Goemans 2007). Les concentrations de polluants (en particulier ceux ayant une faible solubilité dans l'eau) dans les tissus des anguilles, qui ont un cycle de vie complexe, représentent une combinaison de la



pollution environnementale, ainsi que des charges de pollution des espèces, des eaux de surface et des sédiments dans les écosystèmes aquatiques. Les polluants inorganiques tels que les ML peuvent jouer un rôle dans le déclin des anguilles européennes (Belpaire et al. 2019 ; Romero et al. 2020 ; Pannetier et al. 2016 ; Juszczak et al. 2015). En raison de leur cycle de vie unique, les anguilles européennes sont particulièrement vulnérables à la pollution inorganique (Geeraerts and Belpaire 2010). En raison de la forte teneur en lipides des anguilles, les métaux sous forme organométallique s'accumulent davantage dans leurs tissus (Byer et al. 2015 ; Freese et al. 2016 ; Chiesa et al. 2019). Des études précédentes ont indiqué que les anguilles accumulent plus de métaux que d'autres espèces de poissons (Pannetier et al. 2016). La bioaccumulation des métaux dans les anguilles peut avoir un effet sur leur cycle de vie. Parce que les métaux accumulés pendant la phase jaune des anguilles peuvent être réactivés pendant la migration reproductive, ils peuvent perturber le mouvement et la maturation des gonades et provoquer des événements de toxicité à l'étape embryonnaire (Usero et al. 2003 ; Durrieu et al. 2005 ; Pannetier et al. 2016). La plupart de ces polluants, qui sont généralement des produits chimiques organiques persistants et des métaux lourds, sont considérés comme carcinogènes et certains d'entre eux sont connus pour altérer les fonctions métaboliques et endocriniennes chez les humains. Par conséquent, la consommation d'anguilles est un signe que les humains sont directement exposés à ces polluants (Juszczak et al. 2015 ; Maes et al. 2008 ; Eira et al. 2009). Étant donné qu'il s'agit d'une espèce comestible ayant une grande valeur économique et importante pour la pêche récréative et commerciale, leur contamination représente un potentiel problème de santé publique, car elles sont consommées en grandes quantités en Europe. Cependant, la consommation d'anguilles en Algérie est considérablement plus faible par rapport à l'Europe.

### **11 L'anguille en Algérie :**

Au cours des dernières décennies, les mesures réglementaires internationales ont mis en place des mesures de protection pour l'exploitation des anguilles. Les pays riverains de la Méditerranée ont également pris des mesures pour réglementer leur exploitation. L'Union européenne a instauré des mesures de gestion visant à réduire les mortalités dues aux activités humaines et à améliorer l'état des stocks d'anguilles. En 2009, l'anguille a été inscrite à l'annexe II de la CITES, ce qui a entraîné une demande de certificat d'importation pour les importations d'anguilles vers l'UE. L'Algérie a dû fournir des informations sur la gestion et l'exploitation de l'anguille pour obtenir ce certificat. Des discussions ont eu lieu en 2010 entre l'Algérie et l'UE



pour la reprise des exportations d'anguilles vers l'UE, mais des informations supplémentaires ont été jugées nécessaires pour évaluer la situation de l'anguille en Algérie. En 2014, l'anguille européenne a été considérée comme "gravement menacée" par l'UICN, et des actions de conservation ont été recommandées. En 2015, un quota annuel d'exploitation de l'anguille a été instauré en Algérie pour répondre à la demande croissante d'exportations. L'Algérie a entrepris des études et des démarches pour évaluer la ressource en anguilles et élaborer un plan de gestion scientifique. Cependant, des changements institutionnels ont entraîné le gel du projet.

Dans l'attente des résultats de l'étude d'évaluation, l'Algérie a proposé une synthèse basée sur les études et rapports existants pour mieux comprendre la situation de l'anguille dans le pays. Le document présenté par le secteur de la Pêche et des Ressources Halieutiques en Algérie vise à expliquer le cadre de gestion en place, les connaissances scientifiques disponibles et la situation réelle de l'exploitation et de la commercialisation de l'anguille en Algérie. (CNDRPA ; 2018).

En Algérie, l'exploitation de cette ressource se concentre principalement autour des lacs de la wilaya d'El Tarf, tels que l'estuaire du Mafragh, Lac Mellah, Lac Oubeira et Tonga. L'exploitation de Lac Oubeira et Lac Mellah se fait sous forme de concessions domaniales attribuées par adjudication pour une période de 25 ans (Seridi, 2011). Au cours des dernières années, la production annuelle a montré une faible régularité des quantités pêchées dans la région d'El Kala. Les statistiques de production totale de 1999 à 2017 montrent une fluctuation avec une baisse progressive à partir de 2004. Le pic de production a été atteint en 2001 avec 44,49 tonnes, tandis qu'en 2017, la production n'était que de 5 tonnes, malgré l'attribution de plusieurs concessions dans les lacs de la wilaya. La moyenne annuelle de la production nationale pour cette période est de 16,23 tonnes, avec un minimum de 0,4 tonne enregistrée en 2012 dans le lac El Mellah et un maximum de 36 tonnes en 2001 (Lac Tonga). Cependant, il est important de noter que dans la plupart des pays, les statistiques de pêche à l'anguille sont incomplètes ou ne sont pas collectées régulièrement, et les efforts de pêche correspondants sont souvent absents. (CNDRPA ; 2018).

**Tableau 01** : statistiques de production de l'Anguille 2000-2008 (CNDRPA ; 2018).

Plan d'eau /Années	Tonga	Mellah	Oubeira	Mafragh	Total
1999	11,67	1,38	*	*	13,05
2000	13,2	*	*	*	13,02
2001	36	*	*	*	36
2002	22,07	*	*	*	22,07
2003	17,55	*	*	2,45	20
2004	25,4	*	*	2,7	28,1
2005	5	*	*	2,59	7,59
2006	*	*	*	*	2,64
2007	1,8	*	10,1	2,22	14,12
2008	2,91	1,6	7,5	2,02	14,02
2009	5,2	5,8	3,2	*	14,2
2010	*	3,4	*	*	3,4
2011	*	*	*	*	
2012	*	0,4	*	*	0,4
2013	*	*	*	*	*
2014	*	*	*	*	*
2015	*	3	*	*	3
2016	*	3	*	*	3
2017	2	0,4	3	3	8,4

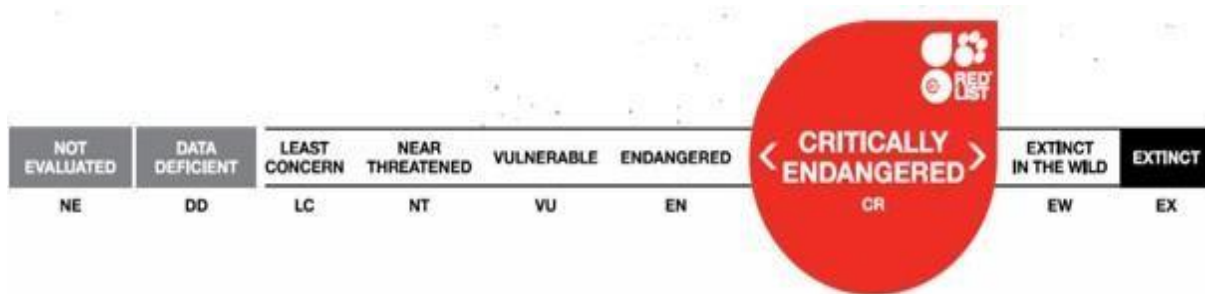
## 12 Mesures de protection :

Face à l'effondrement constaté du stock d'anguilles et aux multiples alertes émises par la communauté scientifique, le Conseil Européen a adopté, le 18 septembre 2007, le [Règlement Européen \(EC\) No 1100/2007](#). Ce texte impose aux États membres d'élaborer un Plan de Gestion pour chaque bassin versant, avec pour objectif de « réduire la mortalité anthropique afin d'assurer avec une grande probabilité un taux d'échappement vers la mer d'au moins 40



% de la biomasse d'anguilles argentées, correspondant à la meilleure estimation possible du taux d'échappement qui aurait été observé en l'absence d'influences anthropiques ».

Par ailleurs, cette espèce a été inscrite à l'annexe II de la convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES) en 2007. Ce texte est entré en vigueur le 13 mars 2009 et stipule que toutes les exportations d'anguilles doivent être assorties d'un permis. De plus, toutes opérations commerciales dans et en dehors de l'Union Européenne sont interdites mais restent possibles entre les pays n'appartenant pas à l'UE (CITES, 2007). En 2009, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) a classé l'anguille européenne dans sa liste rouge comme espèce en danger critique (Jacoby et Gollock, 2014) (Figure 14). La France avait déjà fait de même en 1992 en classant l'espèce comme vulnérable au livre rouge des espèces menacées (Elie, 1992). Plus récemment, l'anguille européenne a été ajoutée à l'Annexe II de la Convention sur les espèces migratrices (CMS) en 2014, appelant les parties (couvrant la quasi-totalité de l'aire de distribution de l'anguille européenne) à développer des actions de conservation et de coopération entre les états membres (CMS, 2014).



**Figure 14 :** Inscription de l'anguille européenne à liste rouge de l'UICN comme espèce en danger critique (d'après Jacoby et Gollock, 2014).



## **1. Présentation des sites d'étude :**

Cette thèse se focalise sur deux sites d'étude situés à l'extrême nord-est de l'Algérie : l'estuaire du Mafragh, qui se déverse sur le littoral de la wilaya d'Annaba, et le lac Tonga, dont les eaux s'écoulent via l'oued Messida vers le littoral d'El Kala, dans la wilaya d'El Tarf.

### **1.1 Lac Tonga :**

Le lac Tonga est un étang d'eau douce relié à la mer par le canal artificiel de la Messida. Il se singularise par la présence d'îlots flottants colonisée par des saules et de grandes plages d'eau libre partiellement occupées par le nénuphar blanc. C'est la zone de nidification la plus importante d'Afrique du Nord. C'est une zone humide d'importance internationale classée "Ramsar" et une réserve intégrale du parc national d'El Kala (PNEK).

Avant les tentatives d'assèchement à la fin du XIXe siècle, le lac Tonga était à l'origine le confluent de deux grands fleuves, oued El Hout dont le réseau hydrographique s'étend au sud puis à l'est et oued El Eurg qui draine le nord-est. Son émissaire est un canal aménagé pour drainer les eaux du lac vers la mer. Aujourd'hui, il ne reçoit plus l'eau de l'oued El Eurg. Le plan d'eau du lac joue un rôle essentiel dans la lutte contre les inondations en hiver en retenant les sédiments arrachés en amont, ce qui mène à son remplissage progressif (Lazli et al, 2012).

#### **➤ Localisation :**

Le bassin versant du lac Tonga est localisé à l'extrême Nord Est de l'Algérie à environ 3 km de la frontière Algéro-Tunisienne à l'Est et à l'Ouest d'environ 80 km des complexes industriels d'Annaba. Ses coordonnées géographiques sont comprises entre 08° 29' et 08°38'E et 36° 30' N. Sa superficie totale s'étend sur 16 390 ha ; Son altitude moyenne est comprise entre 10 et 550 m. Elle croit d'Est en Ouest elle culmine à 562 m à Kef El Hammam. (Figure 15). Son plan d'eau de 2300 ha, correspond à 12% de l'ensemble ; il est le réceptacle de deux oueds qui ont édifié les cônes de déjection qui forment les plaines d'Oued El Hout (225 ha) et d'Om Teboul 200 ha). Il est constitué de trois sous-bassins :

- Le sous bassin versant d'Oued El Eurg au Nord, beaucoup plus important, qui draine les eaux du Nord-Est et de l'Est, la route d'Oum Tebboul à El Aïoun délimitant la ligne de partage des eaux entre ces deux sous-bassins versants.



- Le sous bassin versant d'Oued El Hout au Sud, limité au Nord par une série de Kefs (à altitude variant entre 209 et 513 m d'Ouest en Est. L'Est par la route d'El Aïoun à Ain Draham et au Sud par la route d'El Aïoun à la mechta Oued El Hout.
- La zone qui s'étend depuis la bordure Sud du massif dunaire de la rive gauche du canal de la Messida jusqu'à la rive Sud du lac (Raachi, 2007).

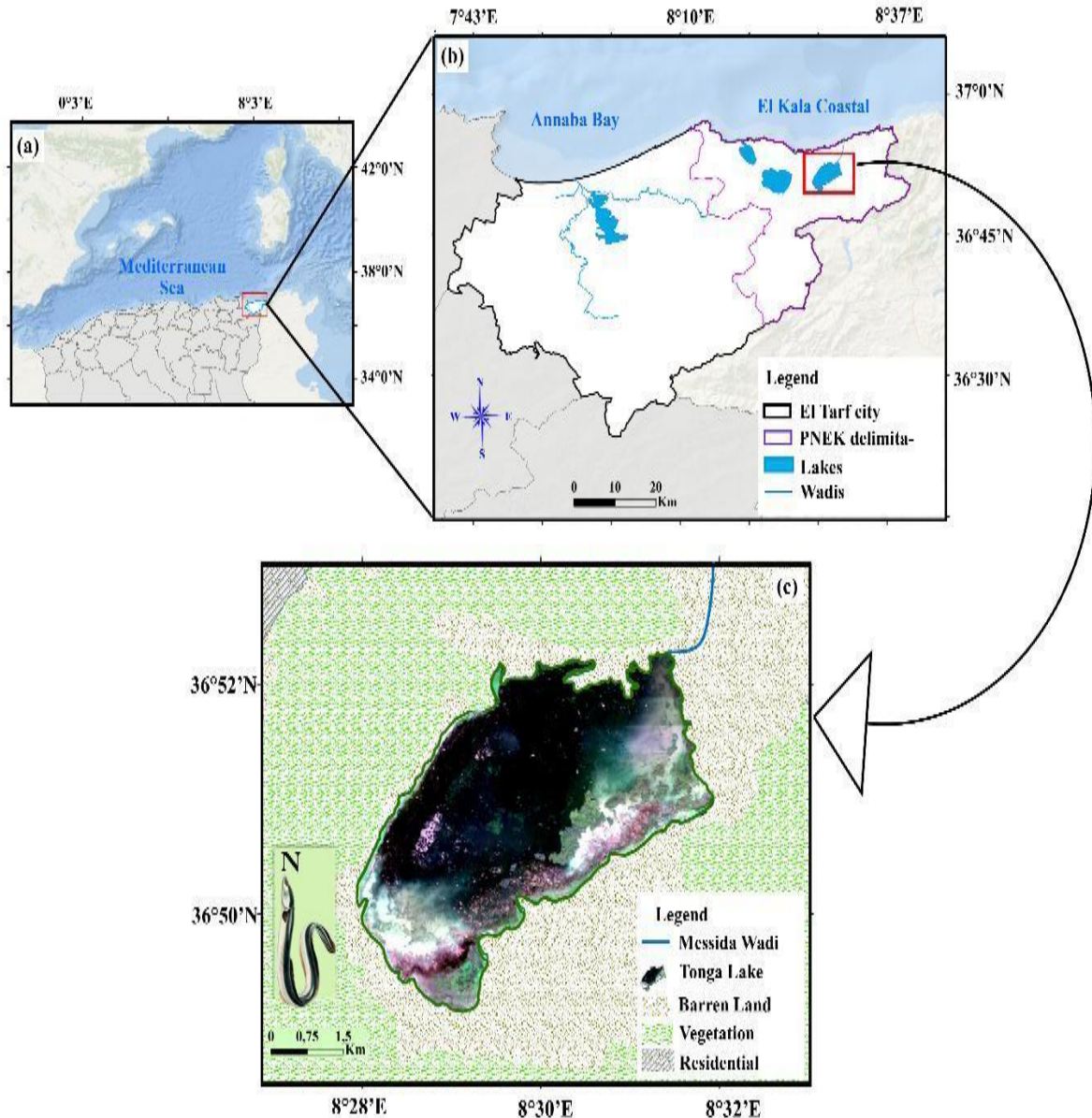


Figure 15 : localisation du lac Tonga (Présent travail)



➤ **Hydrologie, volume et profondeur :**

Le bassin versant du lac Tonga présente deux cours d'eaux majeures qui coulent toute l'année Oued El Hout, long de 14 km, et Oued El Eurg qui fait 10 km de longueur. L'exutoire de Tonga est l'Oued Messida. Le volume du lac Tonga est d'environ 28.000.000 m<sup>3</sup> en période de pré-étiage, cette valeur doit être sensiblement supérieure en période de pleine eau. Le volume et la surface en eau sont sensiblement variables du fait de son caractère endoréique et l'intense évaporation estivale pouvant retirer un volume d'eau important, supérieur à 50% du volume maximum (Draïdi, 2014). Les relevés bathymétriques montrent que le lac Tonga se caractérise par des changements de profondeur relativement faibles. C'est un plan d'eau peu profond, et la profondeur maximale mesurée en été est de 1,80 m.

➤ **Faune et Flore :**

Le lac Tonga est connu pour sa grande biodiversité. Il y a 82 espèces végétales, dont certaines sont classées comme rares, comme *Marsilea diffusa*, *Utricularia exoleta* (Gherib et Lazli, 2017). Les helophytes couvrent près de 80 % de sa superficie (Petit scirpe glabre *Typha angustifolia*, *Scirpus lacustris*, Reed *Phragmites australis*) et les hydrophytes (*Nymphaea alba* et Fennel pondweed *Potamogeton pectinatus*) (Lazli et coll., 2011). Il est considéré comme un important site d'hivernage et de nidification pour plusieurs espèces d'oiseaux aquatiques (Boumezbeur, 1993; Lazli et al., 2011; Gherib et Lazli, 2017), dont certaines sont menacées comme le canard à tête blanche *Oxyura leucocephala* et la sarcelle marbrée *Marmaronetta angustirostris*. En outre, il y a une diversité de poissons, y compris *Barbus callensis*, Mosquitofish *Gambusia affinis*, et l'anguille européenne *Anguilla anguilla* (Lazli, 2011; Benmetir et al., 2020). Le Lac Tonga subit diverses dégradations dont le braconnage, la collecte d'œufs, l'érosion des berges, l'eutrophisation et le pompage de son eau, notamment en période estivale (Lazli et al. 2014 ; Gherib et Lazli, 2017 ; Mecif et al., 2020). De plus, cette zone humide a été cédée comme concession pour l'exploitation de l'anguille.



## 1.2 L'estuaire du Mafragh

### ➤ Localisation :

L'estuaire de la « Mafragh » est situé à l'extrême Nord Est Algérien ( $7^{\circ} 56'$  de longitude Est et de  $36^{\circ} 50'$  de latitude Nord), s'étend sur une longueur de 2 km avec des largeurs de 50 m en amont et 100 m en aval (à l'approche de l'embouchure avec la mer). Le bassin versant de l'estuaire du Mafragh s'étend sur environ 3200 km<sup>2</sup>, du nord-ouest de la Tunisie jusqu'aux côtes d'Annaba. Il est inclus selon les cahiers de l'agence des bassins hydrographiques, dans le bassin versant des côtiers Constantinois-Est et codifié sous le numéro 03 (figures 16).

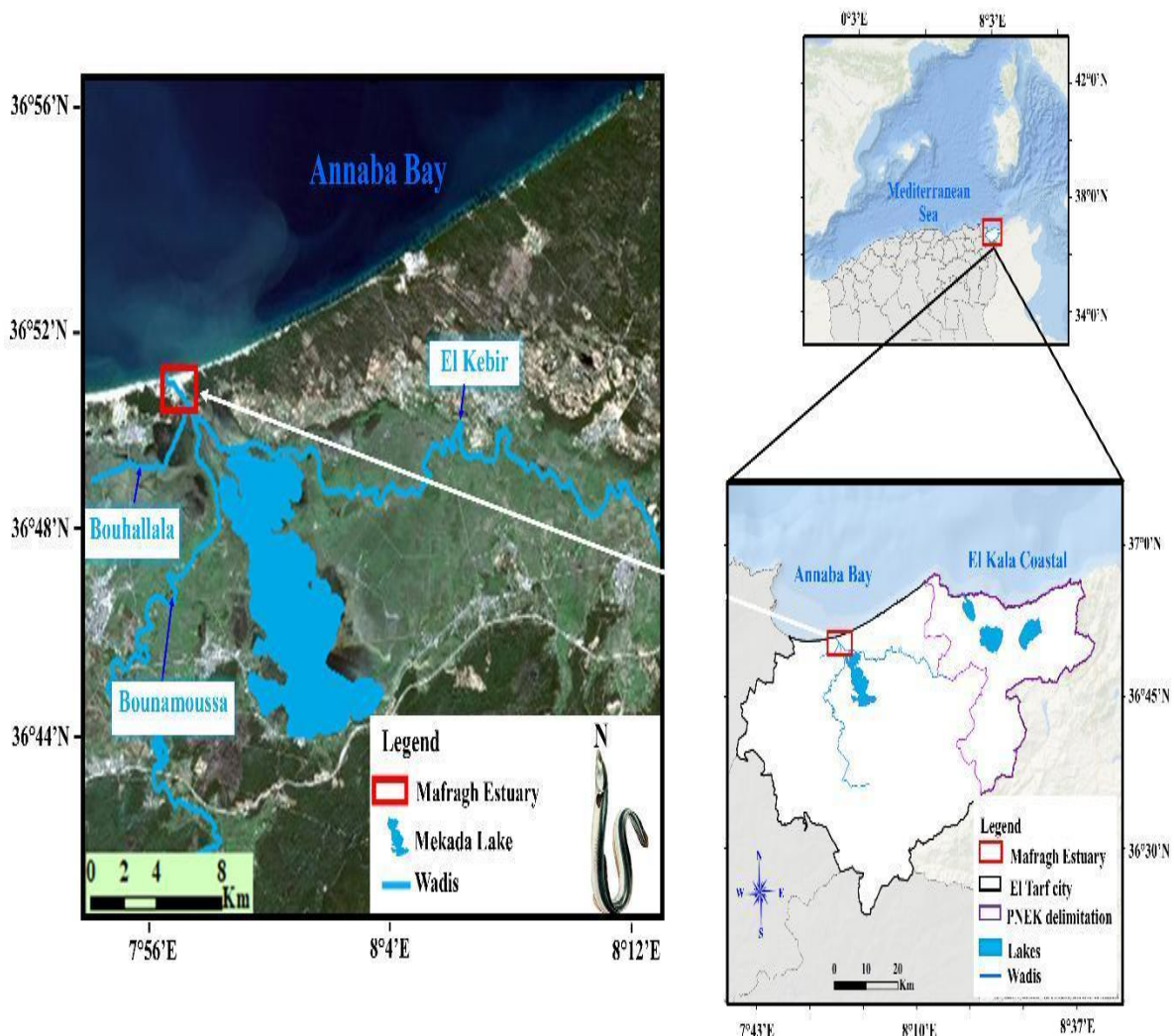


Figure 16 : localisation de l'estuaire du Mafragh  
(Présent travail)



➤ **Hydrologie, volume et profondeur :**

Les principaux oueds qui drainent notre bassin sont El Kébir-Est et Bounamoussa, ainsi que leurs affluents, qui sont moins importants mais qui jouent un rôle complémentaire dans l'écoulement superficiel, l'alimentation et surtout le drainage des nappes superficielles. Oued Bounamoussa draine une vaste dépression de marécages et de terres basses située du côté Ouest de l'estuaire tandis qu'oued El Kébir et son confluent oued Chourka drainent la partie Est constituée d'une vaste étendue marécageuse de plusieurs milliers d'hectares.

Le potentiel mobilisable en eau est de l'ordre 546 Hm<sup>3</sup>/an, la part de contribution la plus importante étant celle d'Oued El Kébir-Est et ses affluents avec 419 Hm<sup>3</sup> (76.73%), celle de Bounamoussa étant de 127 Hm<sup>3</sup> (23.26 %). (Boukleb Chekirou 2017)

L'estuaire a une profondeur de 2 à 3 m selon l'emplacement, l'eau y est saumâtre durant une bonne partie de l'année ; des baisses de la salinité sont cependant notées en période hivernale (saison des pluies).

➤ **Faune et Flore :**

Le long des rives de l'estuaire du Mafragh et au point de convergence des trois Oueds : « El Kebir », « Chorka » et « Bounamoussa », se développe une végétation riche en phragmite et par endroits en tamaris et sur les terrains inondables se développent des salicornes.

### **1.3 Les données météorologiques de la zone d'étude :**

Dans la méditerranéenne, le climat reste un facteur clé à cause de son importance dans l'existence et l'évolution des écosystèmes (Aidoud, 1997). Il a une influence directe sur la faune et la flore (Samraoui & de Belair, 1997). C'est le climat qui régule la distribution des êtres vivants. Parmi ses composantes, on compte principalement la température, la pluviométrie, et le vent.

Le climat de l'Est algérien est un climat méditerranéen tempéré et subhumide, avec des hivers marqués par une forte pluviométrie et des étés plus ou moins secs.

Pour une meilleure description du climat de nos zones d'études, nous avons recueilli 3 séries de données météorologiques : la température (Figure 17 a et b), la pluviométrie (Figure 17 c et d),



et la vitesse du vent (**Figure 17** e et f) sur une période de 14 ans (de 2008 à 2021) pour la région d'Annaba et de 6 ans (2008-2014) de la région d'El Kala ([ONM, 2021](#)).

➤ **La température de l'air**

La courbe des températures moyennes de l'air entre 2008 et 2021 dans la ville d'Annaba montre une augmentation constante de 2006 à 2021, 2013 étant l'année la plus froide avec 17,6°C et 2021 la plus chaude avec 28,4°C (**Figure 17** a). Des anomalies négatives ont été observées entre 2008 et 2013 (voir les histogrammes verts dans la **Figure 17** a), les anomalies positives dominant après 2013 (voir les histogrammes bleus de la **Figure 17** a), ce qui indique un réchauffement soutenu dans la région, affectant particulièrement les surfaces d'eau telles que l'estuaire de Mafragh. En revanche, la température caractérisant la région d'El Kala (**Figure 17** b) présente une tendance fluctuante, avec une légère baisse de 2006 à 2010, suivie d'une reprise modérée en 2014. Les anomalies négatives observées entre 2009 et 2011 mettent en évidence des années plus fraîches que la moyenne (voir les histogrammes verts dans la **Figure 17** f).

➤ **La pluviométrie**

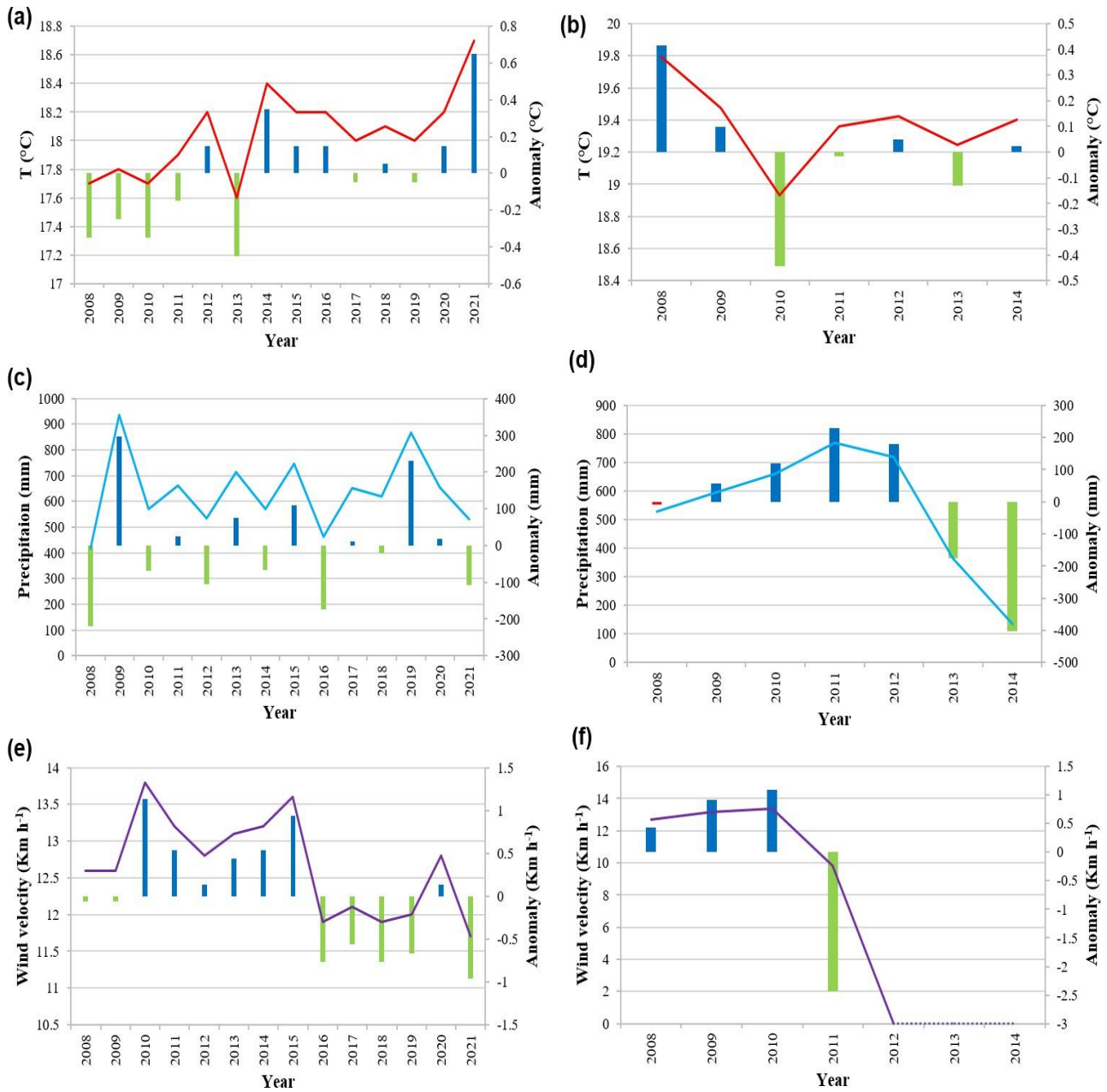
L'analyse des données recueillies de l'ONM révèle que les précipitations à Annaba (**Figure 17** c) sont très variables, avec plusieurs pics (notamment ceux de 2010 et 2019). Néanmoins, on observe un déclin progressif vers 2021, et les anomalies négatives deviennent plus fréquentes après 2015 (voir les histogrammes verts dans la **Figure 17** c). La région d'El Kala présente un schéma différent (**Figure 17** d), avec une forte augmentation des précipitations de 2006 à 2010, un pic en 2010, puis une forte diminution à partir de 2011. Les anomalies négatives dominent après 2013 (voir les histogrammes verts dans la **Figure 17** d), pouvant indiquer des conditions de sécheresse. En effet, la région d'El Kala est caractérisée par un taux d'humidité est très élevé tout au long de l'année et reste presque constante tout au long de l'année. Cela est principalement dû à l'effet régulateur des océans et des masses d'eau et aux riches écosystèmes forestiers de la région qui contribuent à maintenir une humidité élevée en été, réduisant ainsi la durée et l'intensité des sécheresses estivales ([Djamai, 2020](#)). Selon la station météorologique du Lac des Oiseaux (période 1988-2018), les valeurs les plus élevées sont enregistrées en décembre (début de l'hiver) et les plus basses en Juin (au début de l'été). D'ailleurs, l'hiver est la saison la plus arrosée avec un total de précipitations de 257,30 mm en revanche l'Été paraît la saison la plus sèche avec un total de



précipitations de 28,40 mm ce qui démontre le déficit hydrique associé aux fortes insolation, déshydratation et évaporation des surfaces aquatiques. La répartition de la majorité des précipitations pendant la saison humide favorise un excès d’eaux ce qui peut exposer la région durant cette période a des inondations répétées d’une année à l’autre.

➤ **Le vent**

La vitesse du vent à Annaba montre une augmentation initiale jusqu'en 2015, suivie d'une stabilisation ou d'un léger déclin vers 2021. Les anomalies de vent reflètent également cette tendance, avec des valeurs positives prédominantes avant 2015 (voir les histogrammes bleus dans la **Figure 17 e**) et des valeurs négatives par la suite (**Figure 17 e**). Quant à El Kala, une augmentation graduelle est constatée entre 2008 et 2010, la vitesse du vent diminue fortement après 2011, les anomalies passant de positives à fortement négatives (voir histogramme vert dans la **Figure 17 f**), suggérant ainsi une réduction significative de l'intensité du vent au cours des dernières années (**Figure 17 f**).



**Figure 17 :** La variabilité interannuelle de la température au niveau de la ville d’Annaba et la région d’El Kala, respectivement, (a et b) des précipitations (c et d), et du vent (e et f) en se basant sur des données météorologiques collectées par l’ONM dans l’Est algérien pendant la dernière décennie.



## 2. Capture et traitement des anguilles :

Notre étude a ciblé une sous population d'anguille peuplant deux plans d'eau différents : le lac Tonga et l'estuaire du Mafragh. Les anguilles sont transférées et maintenues vivantes au laboratoire afin de subir le protocole spécifique à chaque partie entrant dans le cadre de cette thèse et qui s'articule sur 4 axes :

- ✓ Structure de la sous population d'anguille étudiée (croissance et argenture) ;
- ✓ Analyse du régime alimentaire ;
- ✓ Biodiversité de la flore parasitaire (ecto et endoparasites) ;
- ✓ Contamination et bioaccumulation métallique (dosage des métaux lourds).

Les anguilles ont été capturées à l'aide des nasses ([Figure 18](#)), ce sont des engins de pêche de formes cylindriques conçues de manière à permettre aux anguilles d'entrer facilement, mais à rendre leurs sorties plus difficiles. Les dimensions peuvent varier, mais elles sont généralement assez grandes pour accueillir plusieurs poissons à la fois, dont la maille est d'une moyenne de 10 mm de diamètre. La partie fermée de la nasse est dotée d'un système de fermeture qui permet d'ouvrir et de fermer facilement l'entrée. Elle peut être munie d'une ouverture à charnière, d'un système de verrouillage ou d'un mécanisme de traction pour faciliter l'accès à l'intérieur de la nasse. Tandis que la partie ouverte est munie de grilles ou de mailles de petite taille qui permettent aux anguilles d'entrer, mais qui les empêchent de sortir facilement, d'ailleurs une fois elles sont entrées dans la nasse, elles ont souvent du mal à retrouver l'ouverture et à s'échapper. Cela permet aux pêcheurs de revenir plus tard pour les récupérer. Les nasses sont déposées sur le fond dans les endroits propices au passage des anguilles.



**Figure 18** : Engin de pêche de l'anguille « nasses » ([Présent travail](#))



**Axe 1 : Structure de la sous population d'anguille étudiée (croissance et argenture)**

Pour la réalisation de cette étude nous avons sacrifié 180 anguilles du lac Tonga avec un échantillonnage aléatoire de 15 anguilles par mois s'est étalée de décembre 2016 à novembre 2017 ; tandis qu'à l'estuaire du Mafragh nous n'avons eu que 97 anguilles de janvier à la fin mars de l'année 2017. Les anguilles sont transférées et maintenues vivantes au laboratoire puis anesthésiées dans une solution 1:10 d'huile de clou de girofle dissoute dans de l'éthanol (70%) selon (Walsh & Pease, 2002) , afin de subir le protocole comprenant les opérations décrites dans ce qui suit :

**1. Croissance corporelle :**

✓ *Mesure des caractères morphologiques externes :*

La longueur totale (Lt) des individus a été mesurée au mm près à l'aide d'un ichtyomètre. Le poids total (Wt) a été mesuré au gramme près à l'aide d'une balance. (Figure 19).



**Figure 19** : Mesures biométriques des anguilles capturées (à gauche : mesure de la taille ; à droite : prise de poids) (Présent travail)

✓ *Relation taille/poids*

L'équation suivante exprime la relation entre la longueur totale et le poids total d'un poisson (Ricker, 1973) :

$$Pt = a \times Lt^b$$



Dans cette équation :

- $P_t$  représente le poids frais du poisson
- $L_t$  représente la longueur totale du poisson
- $a$  est une constante
- $b$  est le coefficient d'allométrie

La relation allométrique entre la longueur et le poids des anguilles permet de caractériser leur morphologie corporelle. Le **coefficient d'allométrie**  $b$  traduit la nature de la croissance. Lorsque  $b=3$ , on parle de croissance isométrique, c'est-à-dire que toutes les dimensions du corps croissent à un rythme proportionnel (Ricker, 1973). En revanche, si  $b$  diffère de 3, la croissance est dite allométrique : elle est **minorante** lorsque  $b < 3$  (le poids augmente moins vite que la longueur) ou **majorante** lorsque  $b > 3$  (le poids augmente plus rapidement) (Folkvord & Mosegaard, 2002).

#### ✓ *Coefficient de condition (K)*

Le coefficient de condition  $K$ , quant à lui, offre une indication rapide sur l'état physiologique et le bien-être global de l'individu. Il reflète indirectement ses réserves énergétiques. Ce ratio est couramment utilisé en ichthyologie pour comparer l'état nutritionnel entre individus ou populations (Tesch, 1971).

La formule utilisée est la suivante :

$$K = 100 \times (M_t / (L_t)^3)$$

Où :

- $M_t$  représente la masse totale (en grammes)
- $L_t$  représente la longueur totale (en centimètres)

#### ✓ *Modélisation de la croissance*

Pour analyser la croissance somatique, nous avons appliqué le modèle de Von Bertalanffy, largement utilisé en halieutique (Panfili et al., 2002). Il permet de modéliser la croissance en longueur à travers l'équation :



$$L_t = L_{\infty} (1 - e^{-K(t-t_0)})$$

Dans cette équation,  $L_t$  représente la longueur moyenne à l'instant  $t$ , et  $L_{\infty}$ ,  $K$  et  $t_0$  sont des paramètres à déterminer.

Nous avons également modélisé la croissance en fonction du poids (Panfili et al., 2002) en utilisant la formule suivante :

$$P_t = P_{\infty} (1 - e^{-K(t-t_0)})^3$$

La validation des âges a été réalisée selon une méthode **semi-directe** basée sur la lecture des marges des pièces calcifiées (sclérochronologie). La présence ou l'absence de marques de croissance est exprimée en pourcentage par mois et tracée graphiquement pour détecter les cycles annuels (Panfili et al., 2002).

## 2. Stades d'argenture :

### ✓ *Calcul de l'indice de la nageoire pectorale (ILP%)*

La longueur de la nageoire pectorale ( $L_p$ ) a été mesurée et rapportée à la longueur totale ( $L_t$ ) donnant l'indice (ILP) : (Figure 20).

$$ILP = (L_p/L_t) \times 100$$

Où :

- $L_p$  représente la longueur de la nageoire pectorale en millimètres
- $L_t$  représente la longueur totale du corps en millimètres

Selon Durif (2003), (ILP < 4%) correspond à un stade jaune, tandis (ILP ≥ 5%) indique un individu en phase argentée.



**Figure 20** : Mensurations de la nageoire pectorale (Lp) (Présent travail)

✓ *Calcul de l'Indice Oculaire (IO)*

Nous avons mesuré avec une précision de dixième de millimètre (à l'aide d'un pied à coulisse) les diamètres oculaires horizontaux et verticaux des yeux droit et gauche (DhG, DhD, DvG, DvD) (Figure 21). L'indice oculaire peut être un indicateur du stade de développement de l'anguille, car il existe une forte corrélation entre le diamètre oculaire et le diamètre des ovocytes (Pankhurst, 1982b).

L'indice oculaire a été calculé comme suit :

$$IO = \{((DvG + DhG)/4) \times ((DvD + DhD)/4) \times \pi/Lt\} \times 100$$

Où :

- Dv : diamètre vertical de l'œil en millimètres
- Dh : diamètre horizontal de l'œil en millimètres
- Lt : longueur totale du corps en millimètres



**Figure 21** : Mensurations du diamètre horizontal (Dh) et vertical (Dv) de l'œil (Présent travail)



Lorsque  $IO \leq 6.5$ , l'anguille est considérée « jaune » ; au-dessus de cette valeur, elle est considérée « argentée ».

✓ *Détermination du stade de maturité sexuelle*

Le niveau de maturité sexuelle (S) est déterminé à partir des données morpho-métriques de chaque individu, telles que la taille (mm), le poids (g), la longueur pectorale (mm) et le diamètre oculaire (mm), qui ont été préalablement mesurés. Pour chaque stade (i), l'indice S a été estimé à l'aide d'une équation prenant en compte la longueur, le poids, le diamètre oculaire et la longueur pectorale :

$$S_i = K + L \times Li + P \times Pi + D \times Di + Lp \times Lpi$$

À partir des coefficients proposés par Durif et al. (2005). Le stade le plus élevé (Smax) détermine la maturité de l'individu.

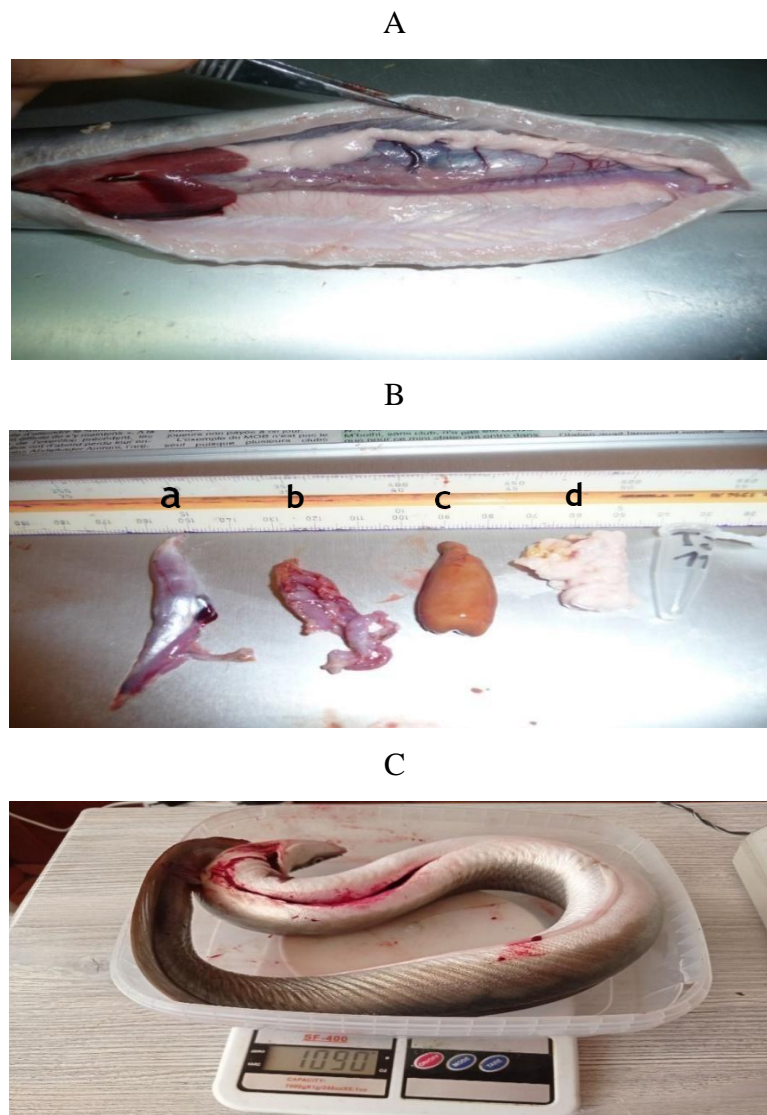
**Tableau 2** : Coefficient de pondération pour la détermination de chaque stade de l'anguille (Durif et al., 2005).

Phase de migration	Résident		Migrant			
	I (indifférencié)	Pré migrant FII (Femelle)	FIII (femelle)	FIV (femelle)	FV (femelle)	MII (mâle)
Constante K	-61,276	-87,995	-109,014	-113,556	-128,204	-84,672
Longueur (corps) Li	0,242	0,286	0,28	0,218	0,242	0,176
Poids Pi	-0,108	-0,125	-0,127	-0,103	-0,136	-0,116
Diamètre moyen de l'oeil Di	5,546	6,6627	9,108	12,187	12,504	12,218
Longueur (pectorale) Lpi	0,614	0,838	1,182	1,23	1,821	1,295



✓ *Dissection des anguilles poids éviscéré*

La dissection des anguilles a été réalisée de manière méthodique afin d'exposer les organes internes sans endommager les structures d'intérêt. L'intervention débute par l'introduction délicate des ciseaux au niveau de l'orifice anal. Une première incision est tracée horizontalement le long de la paroi abdominale, jusqu'à atteindre la base des nageoires pelviennes. Depuis ce point, une coupe verticale est réalisée en direction du dos, longeant les muscles dorsaux, avant de poursuivre par une incision parallèle à la base de ces mêmes muscles. Une dernière coupe relie les deux extrémités précédentes, délimitant ainsi une "fenêtre anatomique" qui peut être soulevée pour révéler la cavité abdominale. (Figure : 22)



**Figure 22** : Photographie d'une anguille disséquée : A ; Organes prélevés après dissection : B (a : vessie gazeuse ; b : tube digestif ; c : foie et d : gonades) ; Pesée de l'anguille éviscérée :C

(Présent travail).



Une fois cette ouverture effectuée, les organes internes sont soigneusement exposés. Les anguilles sont ensuite éviscérées, puis pesées, dans le but de poursuivre les analyses morpho-anatomiques ou physiologiques prévues dans l'étude.

✓ *Rapport gonado-somatique (RGS%)*

Le poids des gonades (Pg) a été mesuré avec une précision d'un gramme (Figure 23) afin de pouvoir calculer le rapport gonado-somatique (RGS) comme suit :

$$\text{RGS (en \%)} = (\text{Pg/Pt}) \times 100$$

Le RGS est utilisé pour évaluer la maturité des gonades chez les anguilles argentées mâles (RGS > 0.2%) et femelles (RGS > 1%) lors de la migration d'avalaison (Fontaine, 1994 ; Marchelidon et al., 1999 ; Acou et al., 2003 ; Durif, 2003).



**Figure 23 :** Pesée des gonades (Présent travail)

✓ *Rapport hépato-somatique (RHS)*

Le poids du foie (Pf) a été mesuré avec une précision d'un gramme (Figure 24) pour calculer le rapport hépato somatique (RHS) selon la formule suivante :

$$\text{RHS (en \%)} = (\text{Pf/Pt}) \times 100$$



**Figure 24** : Pesée du foie (Présent travail)

Le RHS des anguilles argentées peut varier entre 0,5% et 5% en fonction des sexes et des individus (Durif, 2003). Du stade jaune à argenté, le RHS passe en moyenne de  $1,72 \pm 0,59\%$  à  $1,24 \pm 0,30\%$  car l'anguille cesse de se nourrir avant de partir en migration.

✓ **Rapport Tube Digestif Vide Somatique (RTDVS %) :**

Le poids du tube digestif vide (Ptdv) a été mesuré avec une précision d'un gramme (Figure 25) afin de calculer le rapport tube digestif vide-somatique (RTDVS) selon la formule suivante :

$$\text{RTDVS (en \%)} = (\text{Ptdv/Pt}) \times 100$$



**Figure 25** : Pesée du tube digestif vide (Présent travail)

Lorsque le  $\text{RTDVS} \leq 1,5\%$ , l'anguille est considérée comme « argentée » ; au-dessus de cette valeur, elle est considérée comme « jaune ».

### 3. Otolithométrie

L'otolithométrie constitue une méthode de référence pour évaluer l'âge des poissons, en établissant une relation entre leur taille corporelle et les structures de croissance enregistrées



sur les otolithes. Cette approche permet de déterminer l'appartenance des individus à différentes classes d'âge, ce qui est un élément fondamental pour l'analyse de la dynamique des populations.

✓ *Prélèvement des otolithes*

Les otolithes ont été extraits à partir d'une coupe transversale réalisée à l'arrière du crâne, en traversant la zone postérieure de l'os pré-operculaire. Une fois la tête dissociée du corps, les cavités abritant les oreilles internes ont été localisées et les otolithes prélevés à l'aide de pinces fines, (Figure 26). Conformément à la méthode décrite par Panfili et al. (2002).



**Figure 26** : Prélèvement des otolithes (Présent travail)

✓ *Nettoyage et conservation*

Les structures extraites ont été minutieusement débarrassées des tissus résiduels, séchées à température ambiante, puis conservées dans des micro-tubes étiquetés (Eppendorf), à l'abri de la lumière et de l'humidité, en vue de leur observation ultérieure.

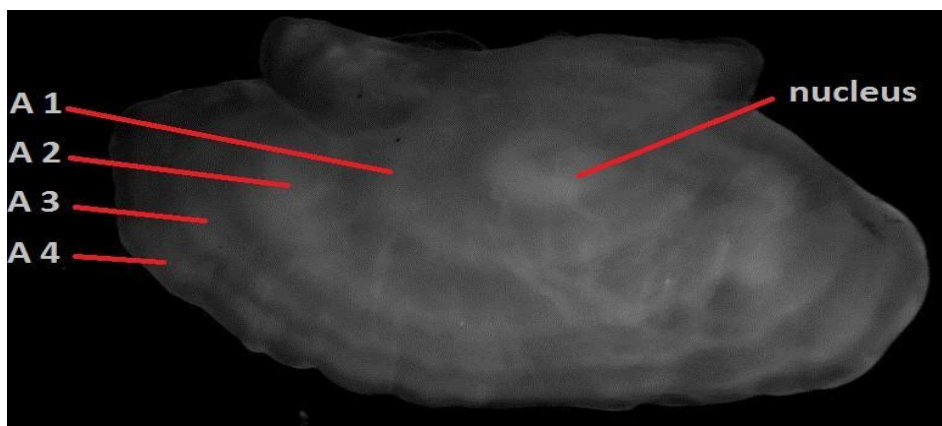
✓ *Observation*

L'analyse s'est appuyée sur l'observation directe à la loupe binoculaire, sans préparation préalable, avec éclairage incident sur fond sombre. Pour renforcer la lisibilité des marques, un bain d'alcool a été utilisé comme agent de contraste. Les otolithes révèlent une alternance de zones opaques (fortement calcifiées, croissance estivale) et hyalines (moins denses, croissance hivernale). Ces motifs saisonniers permettent d'identifier les périodes de croissance et les ralentissements liés à des conditions environnementales défavorables (froid, jeûne, stress).



La lecture des lignes d'arrêt de croissance (L.A.C.), considérées comme annuelles, permet de déterminer l'âge chronologique des individus. L'analyse repose sur l'identification régulière de ces séquences de croissance et leur différenciation par rapport aux marques accidentelles. Les otolithes de l'anguille présentent deux parties principales (Figure 27) :

- ✓ Le nucleus (centre), vestige du stade civelle, marqué par une zone de transition correspondant à l'entrée en eaux continentales.
- ✓ La zone périphérique, qui traduit la croissance en milieu continental jusqu'à la migration en mer. L'interprétation des annuli dans cette zone permet de reconstituer le cycle de vie de l'individu.



**Figure 27** : Interprétation des marques de croissance à partir d'un otolithe d'anguille âgée de 55 mois (4 ans+) (Tahri, 2016).

✓ *Estimation de l'âge*

L'âge a été évalué par comptage des marques annuelles observées à la loupe binoculaire, avec trois lectures indépendantes par otolithe afin de limiter les biais d'interprétation. Les résultats obtenus ont ensuite été convertis en mois pour chaque individu, selon une procédure standardisée. (Figure 28)

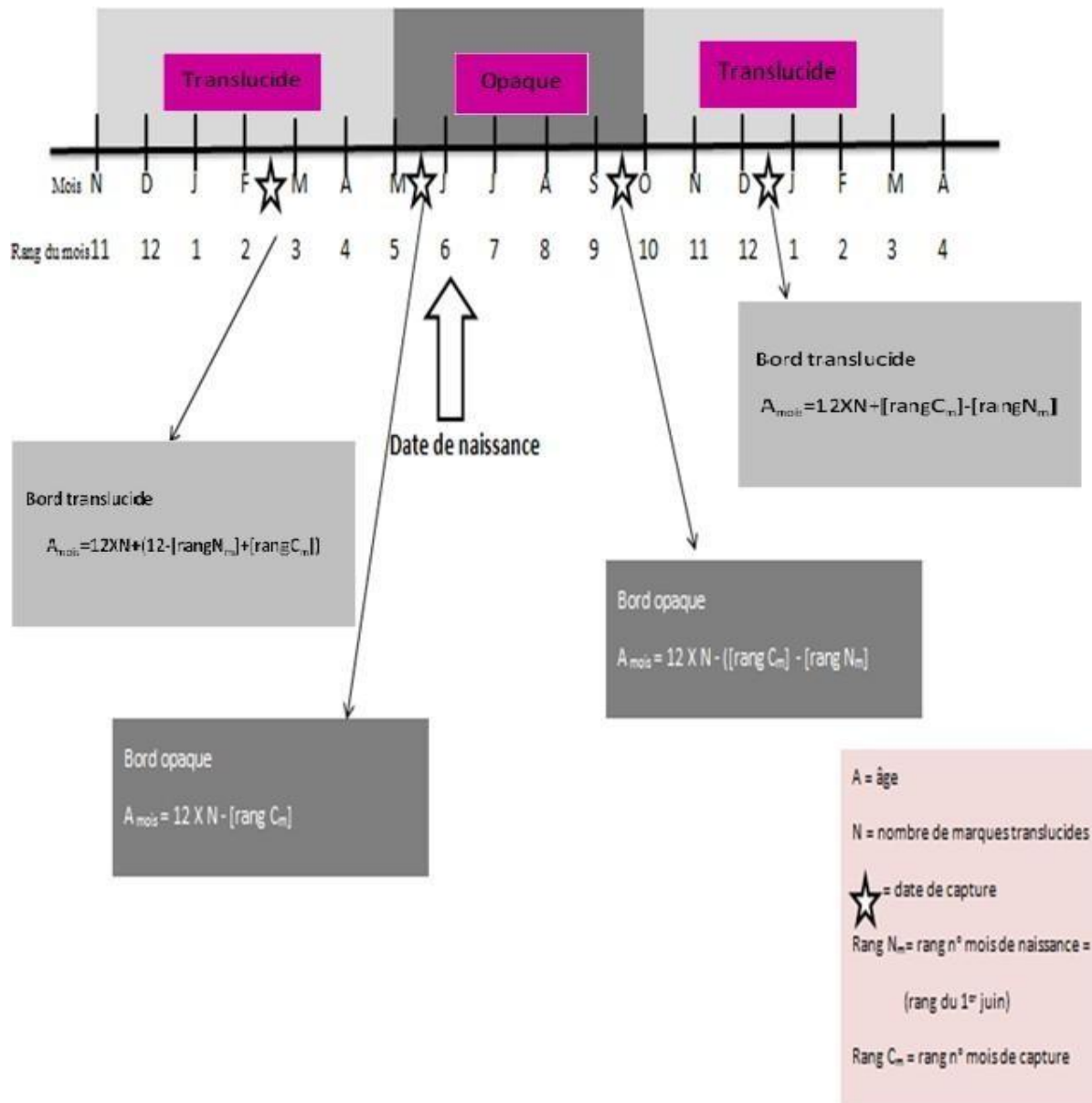
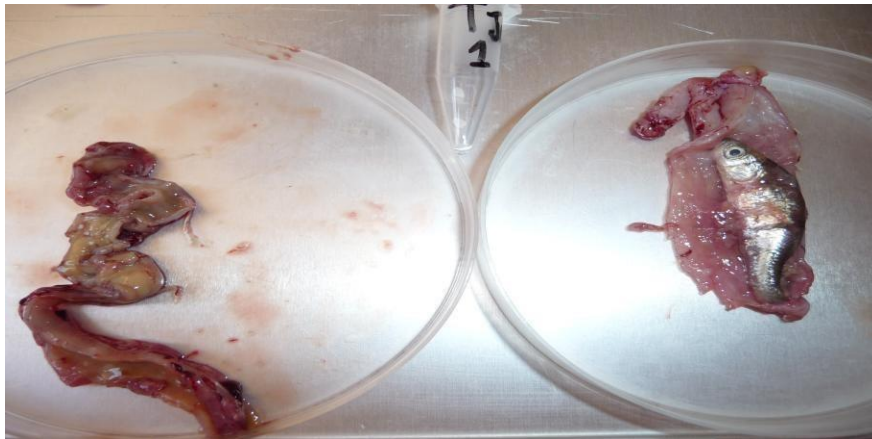


Figure 28 : Calcul théorique de l'âge d'anguille à partir d'otolithe (Panfili et al., 2002).



**Axe 2 : Analyse du régime alimentaire de l'anguille européenne**

Après dissection des anguilles sacrifiées à cette étude, les tubes digestifs ont été ouverts, et leur contenu examiné à la loupe binoculaire. (Figure 29).



**Figure 29** : Tube digestif d'une anguille capturée (présence d'un poisson dans l'estomac)  
(Présent travail)

À l'aide d'une loupe binoculaire, les différentes proies ingérées sont soigneusement examinées. Ensuite, Deux indicateurs ont été calculés :

- ✓ **Coefficient de vacuité (CV%)** : nous permet de quantifier le comportement alimentaire. C'est nombre de tubes digestifs vides ( $N_v$ ) par rapport au nombre total de tubes digestifs examinés ( $N$ ) :

$$CV\% = (N_v / N) \times 100.$$

- ✓ **Fréquence d'une proie (F%)** : c'est le pourcentage obtenu en comparant le nombre total de tubes digestifs contenant une proie spécifique ( $N_i$ ) avec le nombre total de tubes digestifs pleins examinés ( $N_p$ ) :

$$F\% = (N_i / N_p) \times 100.$$



## 1. Ectoparasites :

### ✓ *Prélèvement des branchies :*

Une fois extraites, les branchies ont été placées au congélateur pendant au moins douze heures. Cette étape de congélation, recommandée par Mizelle (1938), favorise le détachement spontané des parasites fixés sur les tissus branchiaux. (Figure. 30).



**Figure 30** : Prélèvement et conservation des branchies (Présent travail)

Pour la récupération, les arcs branchiaux ont été immergés dans une éprouvette contenant environ 100 ml d'eau. Une agitation vigoureuse permet de séparer les parasites des filaments. Le sédiment obtenu est ensuite versé dans une boîte de Pétri et dilué jusqu'à ce que la transparence du milieu permette une observation aisée sous loupe binoculaire. Les parasites visibles sont ensuite isolés un à un à l'aide d'une pipette capillaire, lavés à l'eau claire, puis identifiés au stéréo microscope, conformément à la méthode décrite par Charles et Géry (1968).

## 2. Endoparasites :

### ✓ *Examen de la cavité abdominale :*

La cavité abdominale de chaque anguille a été soigneusement explorée après dissection afin de repérer les parasites internes. L'examen a porté sur divers organes vitaux tels que le foie, le cœur, la rate, les reins, les gonades, la vésicule biliaire, la vessie natatoire, le tube digestif et la



masse musculaire. Un soin particulier a été apporté lors de la manipulation des parasites, souvent fragiles, pour éviter leur dégradation. Une attention spécifique a été accordée à la vessie gazeuse. Après évaluation de son état (opacité, saignements, aspect nacré ou transparent), elle a été incisée dans le sens de la longueur. Les parasites éventuellement présents ont été extraits, nettoyés du liquide sanguin et comptés, le plus souvent encore vivants.

✓ **Identification et conservation des parasites :**

Certains parasites ont été conservés vivants pour étude immédiate, tandis que d'autres ont été fixés pour des analyses ultérieures. L'identification repose sur l'examen des structures morpho-anatomiques, effectué à l'aide d'un stéréo microscope (Olympus SZX 10). Chaque lot de parasites, classé par organe d'origine, a été conservé dans un flacon individuel contenant de l'éthanol à 70 %. Une étiquette précisant la date, le site de capture et l'organe hôte a été apposée sur chaque échantillon. (Figure. 31).



**Figure 31** : Conservation des parasites (Présent travail)



✓ **Calcul des indices parasitaires**

Dans cette étude, nous avons utilisé les indices parasitaires suivants (Bush et al., 1997) :

- **Prévalence spécifique (P)** : C'est le pourcentage du nombre d'hôtes infestés (N) par une espèce spécifique de parasites par rapport au nombre total de poissons examinés (H).

$$P = (N / H) \times 100$$

- **Intensité parasitaire moyenne (I)** : Il s'agit du nombre moyen d'individus d'une espèce parasite (n) dans un échantillon d'hôtes infestés (N). C'est le nombre moyen d'individus d'une espèce parasite par hôte parasité dans l'échantillon.

$$I = (n / N)$$

- **Abondance parasitaire (A)** : C'est le nombre moyen d'individus d'une espèce parasite (n) dans un échantillon d'hôtes par rapport au nombre total de poissons examinés (H). C'est le nombre moyen d'individus d'une espèce parasite par poisson examiné.

$$A = (n / H)$$

Dans ces formules :

- N représente le nombre d'hôtes infestés.
- H représente le nombre total de poissons examinés.
- n représente le nombre total d'individus d'une espèce parasite.



**Axe 4 : Contamination et bioaccumulation métallique chez l'anguille européenne**

Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu un échantillon de 28 anguilles, avec 14 spécimens provenant de chaque site d'étude, dans le but de mesurer les concentrations de certains métaux traces, à savoir le fer et le zinc (métaux essentiels), ainsi que le plomb et le cadmium (métaux non essentiels). L'objectif de cette démarche est de recueillir des données sur l'état de santé des deux sites, et de formuler des recommandations en matière de santé humaine, car il est crucial de ne pas dépasser certains seuils de contamination dans la chair des poissons. De plus, nous avons sélectionné le foie de l'anguille comme second organe pour cette analyse, étant donné qu'il sert de précieux bioindicateur pour les métaux traces.

Nous avons également étudié l'impact des parasites sur l'accumulation métallique de leurs hôtes. Pour cela, nous avons dosé le : Fe, Zn, Pb et Cd dans le muscle et le foie des anguilles les plus et les moins parasitées. Les tissus prélevés sont mis dans des sachets en plastiques et placés dans un conteneur frigorifié en évitant toute contamination métallique jusqu'à la minéralisation. (Figure. 32)



**Figure 32 :** Récolte d'un morceau de muscle et du foie pour les congeler. (Present travail)

**1. Protocole expérimental et traitement des échantillons :**

✓ *Séchage :*

Après décongélation, les échantillons de muscle et de foie ont été séchés séparément dans une étuve à 105°C pendant 24 heures jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids sec constant. En raison d'excès d'huile, les muscles ont été brûlés ensuite dans un four à moufle préchauffé à 580°C pendant  $\pm 4$  heures, afin de transformer les composés organiques en cendre blanche. (Figure. 33)



**Figure 33 :** Etuve et four à moufle. (Present travail)

✓ **Broyage :**

Les échantillons de foie séchés sont réduits en poudre à l'aide d'un mortier en porcelaine. Cette poudre sèche résultante peut être conservée sur une longue période, et sa texture facilite également la solubilisation des échantillons.

✓ **Minéralisation :**

Nous avons opté pour la minéralisation par voie humide afin de réduire la perte de composés volatils organo-métalliques pendant le séchage (F.A.O., 1977). Ainsi, les méthodes adoptées sont celles d'Amiard, 1991 et Amiard et al. 1987 pour le muscle et le foie respectivement.

Pour un gramme de cendre blanche de chaque échantillon de muscle, on a ajouté 20 ml d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) ultra pur (65%) dans des fioles jaugées. Ensuite, on les a placées sur une plaque chauffante à 95 °C jusqu'à combustion complète. De plus, pour un gramme de poudre de foie broyé de chaque anguille sacrifiée à cette étude, on a ajouté 4 ml d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ), et on les a plongés dans un bain-marie afin d'assurer une digestion optimale. (Figure 34)

Les objectifs de la minéralisation sont les suivants :

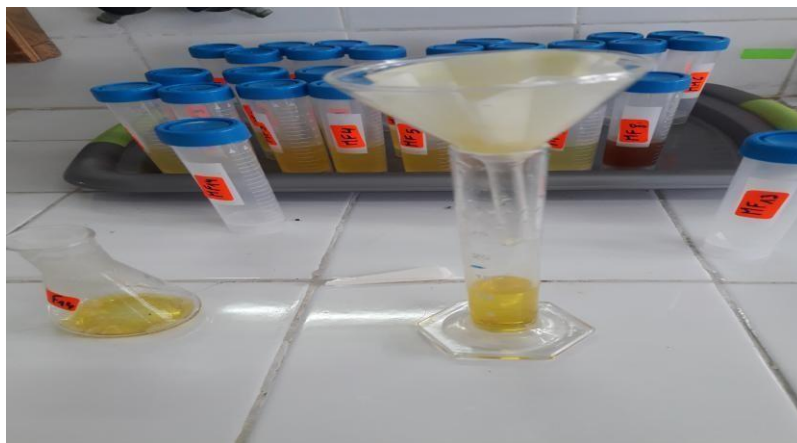
- Ioniser les métaux lourds ;
- Assurer la concentration des métaux ;
- Éliminer l'action perturbatrice du substrat protéique.



**Figure 34 :** Minéralisation à chaud des échantillons (à gauche au bain marie, et à droite sur plaque chauffante). (Présent travail)

✓ *Filtration :*

Après refroidissement, le minéralisât obtenu de chaque échantillon est filtré à l'aide d'un filtre Wattman N° 41. (Figure 35)



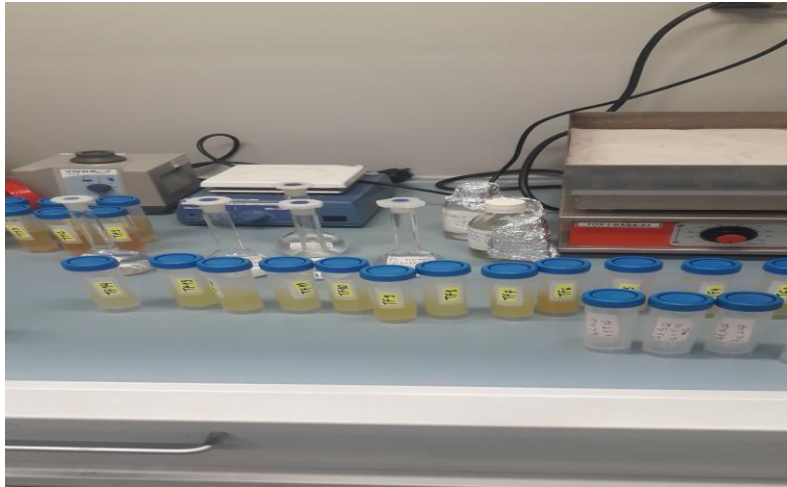
**Figure 35 :** Filtration des minéralisât (Présent travail)

✓ *Dilution :*

Pour doser les métaux à l'aide de la spectrométrie d'absorption atomique, une étape de dilution est indispensable pour réduire la concentration de la solution mère obtenue. Ainsi, nous avons procédé à une dilution de 25% en mélangeant 1 ml de solution mère de chaque minéralisât de

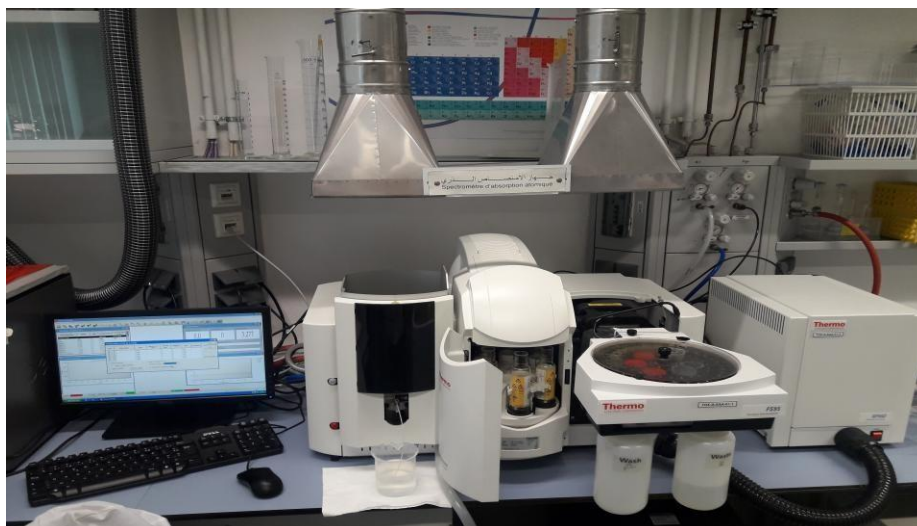


muscle d'anguille avec 24 ml d'eau distillée. Tandis que celles du foie, on les a ajustées à 18 ml d'eau distillée. (Figure 36)



**Figure 36 :** Dilution des échantillons minéralisés (Présent travail)

Pour vérifier la fiabilité de cette méthode de minéralisation, des échantillons blancs (acide pur) sont soumis aux mêmes étapes de préparation et d'analyse. Ensuite, les dosages des métaux lourds (Fer, Zinc, Plomb et Cadmium) sont réalisés à l'aide de Spectrophotométrie d'absorption Atomique (SAA) de marque : Thermo Electron corporation au niveau du laboratoire de l'Institut National de Criminalistique et de Criminologie de la Gendarmerie Nationale. (Fig 37)



**Figure 37 :** Appareil de Spectrophotométrie d'absorption Atomique à four graphite.  
(Présent travail)

## 2. Dosage des métaux traces :

La méthode de dosage de certains métaux traces par Spectrophotométrie d'absorption Atomique (SAA) présente plusieurs avantages : elle nécessite peu de produits chimiques, elle est très sensible et spécifique, elle peut être adaptée pour des analyses automatiques et elle est caractérisée par un minimum d'interférences (Ennouri, 2012). Elle se base sur la capacité des métaux traces à absorber l'énergie fournie sous forme de photons ayant une longueur d'onde spécifique à chaque métal. (Figure 38)



**Figure 38 :** Dosage des métaux lourds (Fer, Zinc, Plomb et Cadmium) par SAA.

(Présent travail)

### ✓ *Méthode d'analyse :*

La méthode de flamme (type : Air- acétylène) a été utilisée pour mesurer la concentration des métaux traces ciblés dans cette étude dont :

- Temps d'aspiration nébuliseur : 4 s.
- Temps de mesure : 4 s.
- Hauteur de brûlure : 7 cm.
- Nombre de mesure : 3.
- Débit de flamme : Fe (0,9 L/min) ; Zn (1,2 L/min) ; Pb et Cd (1,1 L/min).
- Longueur d'onde : Fe (248,3 nm) ; Zn (213,9 nm) ; Pb (217 nm) et Cd (228.8 nm).



### 3. Analyses statistiques :

✓ Axe 1 :

- Logiciel FISAT II.

- tcal\* t-test calculé [basé sur la méthode décrite par [Pauly \(1984\)](#)].

- Un test non paramétrique (paires appariées de Wilcoxon) est effectué pour identifier les différences (en termes d'âge, de longueur, de poids, de K, OI, FI, GSI, HIS, GIS) entre les deux groupes d'anguilles infectées et non infectées de tous les stades, en utilisant le logiciel STATISTICA v. 8.0 (StatSoft Inc.), et figures ont été générées en utilisant le langage statistique R (version 4.1.2).

✓ Axe 3 : Les différences d'abondance parasitaire entre stades ont été examinées à l'aide d'un modèle binomial négatif à inflation nulle, mis en œuvre via la fonction *zeroinfl()* du package **pscl** ([Jackman et al., 2015](#)), afin de gérer l'importante proportion de zéros dans les données. Ce modèle permet de distinguer la probabilité d'occurrence nulle et la distribution des valeurs non nulles. La distribution binomiale négative a été préférée à celle de Poisson pour corriger la surdispersion. Des comparaisons post hoc ont été réalisées à partir des moyennes marginales estimées avec le package **emmeans** ([Lenth, 2018](#)), en appliquant la correction de Bonferroni. L'ensemble des analyses a été effectué sous **R** ([R Core Team, 2023](#)).

✓ Axe 4 : Analyse de variance à un facteur (ANOVA) a été appliquée (test de Fisher), suivie de comparaisons post hoc par paires à l'aide du test de Tukey. Une analyse en composantes principales (ACP) a également été réalisée pour explorer les relations multivariées entre les variables.

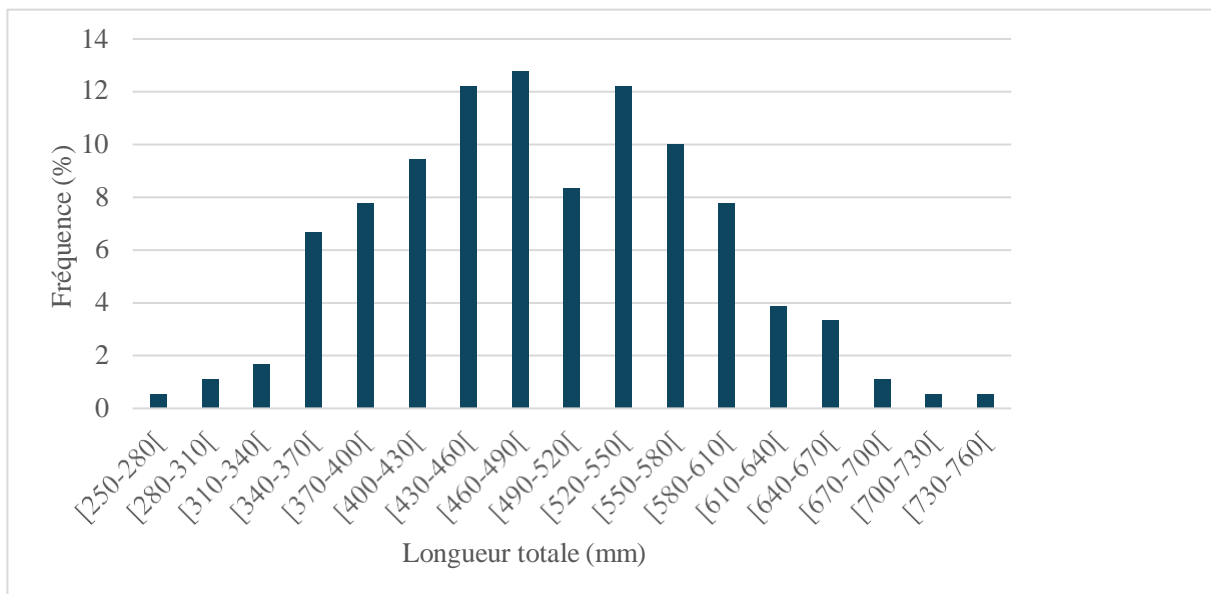


**Axe 1 : Structure de la sous population d'anguille étudiée (Croissance et Argenture)**

**1- Caractéristique de la population d'anguilles du lac Tonga :**

Au cours de la période d'enquête, l'échantillonnage au niveau du lac Tonga a permis de récolter un total de **180** individus dont la longueur totale varie entre 260-730 mm, un poids entre 30 et 645 g, et un âge de 23 à 93 mois (**Figure 39**).

**1-1 Proportion des effectifs des classes de tailles des anguilles collectées dans le lac Tonga :**



**Figure 39 :** Effectif observé au sein de différentes classes de taille des anguilles (*Anguilla anguilla*) capturées au lac Tonga

L'histogramme illustre la répartition en pourcentage des différentes classes de taille des anguilles du lac Tonga, permettant d'identifier les fréquences de chaque classe. Cette distribution aide à comprendre la structure de la population, en révélant des informations sur les cohortes d'âge, les conditions de croissance, et la dynamique de cette espèce dans le lac.

La distribution des tailles est concentrée autour de la classe de taille 450-500 mm, qui représente environ 13 % de la population, constituant ainsi la classe de taille la plus fréquente. Cette concentration se prolonge dans la classe de taille 500-550 mm, avec une fréquence légèrement inférieure d'environ 11 %. Ensemble, ces deux classes dominent la distribution, formant le noyau central de la population étudiée.



En observant les classes de taille plus petites, on note une augmentation progressive de la fréquence des individus entre 300-350 mm (moins de 5 %) jusqu'à 400-450 mm, atteignant un maximum dans les classes 450-500 mm et 500-550 mm. Les classes de taille 350-400 mm et 400-450 mm présentent des fréquences modérées, autour de 6 à 8 %, témoignant de la présence notable d'individus de taille moyenne inférieure.

À partir de la classe de taille 550-600 mm, la fréquence commence à diminuer progressivement. Les classes de 550-600 mm et 600-650 mm montrent des fréquences modérées (environ 6 à 8 %), indiquant une baisse progressive de la représentation des individus de tailles plus grandes. Les fréquences continuent de décroître au-delà de la classe de 650-700 mm, avec des valeurs comprises entre 1 et 3 % pour les classes de tailles les plus grandes (650-700 mm à 750-800 mm). Cela témoigne d'une faible proportion d'individus de grande taille dans la population.

La distribution générale montre une structure symétrique autour des classes de taille centrales (450-500 mm et 500-550 mm), avec une diminution progressive des fréquences de chaque côté de ce noyau central. Cette forme de distribution suggère une population où les individus de taille intermédiaire prédominent, tandis que les tailles extrêmes, petites et grandes, sont moins représentées.

### **1-2 Paramètres de croissance selon Von Bertalanffy (méthode ELEFEN-I) :**

**Tableau 03 :** Paramètres de croissance selon le modèle de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles (*Anguilla anguilla*) du lac Tonga

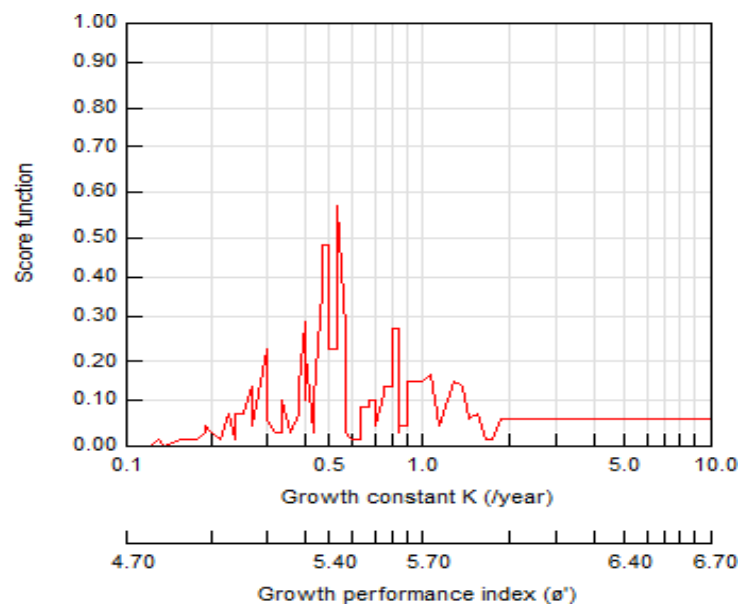
	n	$L_{\infty}$ (mm)	K (year <sup>-1</sup> )	$t_0$ (year)	$\emptyset'$	Lmin-Lmax
Combined	180	782.25	0.54	-0.12	5.519	260-730

- **Longueur asymptotique ( $L_{\infty} = 782.25$  mm) :** Cette valeur représente la taille maximale théorique que les anguilles pourraient atteindre dans des conditions optimales, soit près de 800 mm.
- **Coefficient de croissance ( $K = 0.54$ ) :** Le coefficient K mesure la vitesse de croissance des anguilles. Une valeur de 0.54 indique que les anguilles grandissent à un rythme modéré à rapide.



- **Âge théorique ( $t_0 = -0.12$  ans) :** Le paramètre  $t_0$  est un ajustement dans le modèle de croissance et représente l'âge théorique auquel les anguilles auraient une taille de zéro.
- **Indice de performance de croissance ( $\emptyset' = 5.519$ ) :** L'indice  $\emptyset'$  compare l'efficacité de croissance des anguilles du lac Tonga à d'autres populations. Une valeur de 5.519 est élevée, indiquant que les anguilles de ce lac bénéficient de conditions favorables pour leur croissance.
- **Intervalle de tailles observées (min 260 - max 730 mm) :** Les tailles mesurées dans cet échantillon vont de 260 à 730 mm, en accord avec l'histogramme. La taille maximale observée (730 mm) est légèrement inférieure à la longueur asymptotique théorique ( $L_\infty = 782.25$  mm), ce qui confirme que peu d'anguilles dans le lac atteignent la taille maximale théorique.

La **figure 40** représente comment les valeurs du coefficient de croissance K et de l'indice de performance de croissance  $\emptyset'$  s'ajustent aux données de croissance des anguilles du lac Tonga.



**Figure 40 :** Relation entre le coefficient de croissance (K) et l'indice de performance de croissance ( $\emptyset'$ ) pour la population d'anguilles du lac Tonga (Méthode d'ELEFEN-I)

La fonction de score indique la qualité de l'ajustement pour chaque combinaison de K et  $\emptyset'$ , permettant d'identifier les valeurs optimales pour modéliser la croissance de cette population.

- **Valeurs optimales de K et  $\emptyset'$  :** Le pic de la fonction de score se situe autour de  $K=0.54$  et  $\emptyset'=5.519$ , confirmant que ces valeurs fournissent le meilleur ajustement aux données. Cela signifie que ces valeurs représentent au mieux la dynamique de croissance des

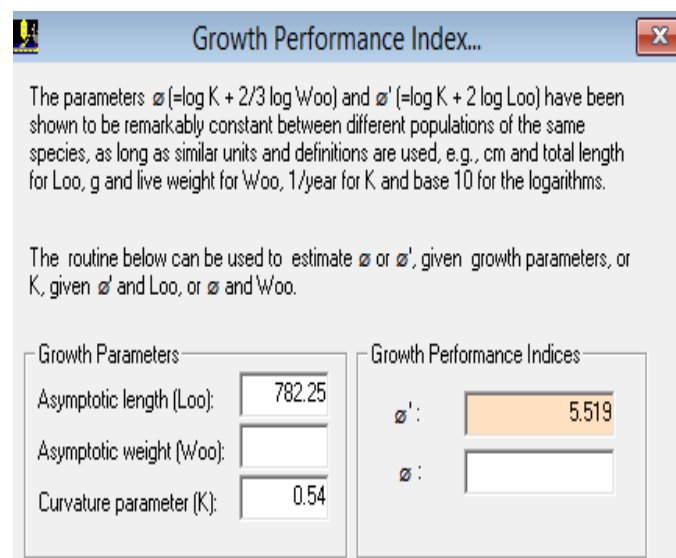


anguilles du lac Tonga. En pratique, cela indique que les anguilles dans cette population grandissent à un rythme modéré-rapide (avec  $K=0.54$ ) et atteignent une taille moyenne optimale avant que la croissance ne ralentisse.

- **Plage de tolérance :** On observe que la fonction de score reste relativement élevée pour des valeurs de  $K$  entre 0.4 et 0.8, et des valeurs de  $\Phi'$  entre 5.4 et 5.6. Cela signifie que des valeurs proches de  $K=0.54$  et  $\Phi'=5.519$  s'ajustent aussi raisonnablement bien aux données, bien qu'elles soient légèrement moins optimales.

### 1-3 Paramètres de croissance des anguilles du lac Tonga (logiciel FISAT II) :

La **figure 41** présente les principaux paramètres de croissance des anguilles du lac Tonga : la longueur asymptotique ( $L_{\infty}$ ), le coefficient de croissance ( $K$ ), et l'indice de performance de croissance ( $\Phi'$ ).



**Figure 41 :** Indice de performance de croissance ( $\Phi'$ ) et paramètres asymptotiques des anguilles (logiciel FISAT II)

Ces valeurs permettent de mieux comprendre comment cette population se développe dans son environnement et de confirmer la dynamique observée dans la structure de taille.

L'équation de croissance de Von Bertalanffy (**tableau 04**) est un outil clé pour modéliser la relation entre l'âge et la taille des anguilles, en prenant en compte des paramètres de croissance propres à chaque population.



Tableau 04 : Équation de croissance de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles du lac Tonga

Von Bertalanffy Equation	
Combined	$L_t = 782.25 [1 - e^{-0.54(t + 0.12)}]$

- **Longueur asymptotique ( $L_\infty = 782.25$  mm)** : Ce paramètre indique la taille maximale que les anguilles pourraient théoriquement atteindre dans des conditions idéales.
- **Coefficient de croissance ( $K = 0.54$ )** : Le coefficient K exprime la rapidité avec laquelle les anguilles se rapprochent de leur taille maximale théorique. Ici, avec une valeur modérément élevée de 0.54, les anguilles atteignent rapidement les tailles intermédiaires qui dominent dans la population.
- **Ajustement d'âge ( $t_0 = 0.12$ )** : Le paramètre  $t_0$  ajuste l'équation pour mieux correspondre aux données de croissance observées. Sa faible valeur (0.12) indique un modèle bien aligné avec les tailles mesurées dès les premiers stades de vie, sans pour autant représenter un âge biologique direct.

L'équation de Von Bertalanffy offre une vue d'ensemble cohérente de la dynamique de croissance des anguilles dans le lac Tonga. Elle met en évidence une croissance rapide vers une taille optimale intermédiaire et suggère que la longueur maximale théorique est rarement atteinte en raison de contraintes locales.

#### 1-4 Relation taille-poids et qualité de croissance :

Le **tableau 05** présente les paramètres de la relation entre la longueur et le poids des anguilles du lac Tonga, en utilisant une régression pour décrire cette relation.

Tableau 05 : Paramètres de régression longueur-poids et qualité de croissance des anguilles du lac Tonga

	n	a	b	R <sup>2</sup>	t cal	significance	GT
Combined	180	4.29	3.22	0.96	4.89	+	A <sup>+</sup>

n\* sample size, a\* intercept, b\* slope, R<sup>2</sup>\* coefficient of determination, tcal\* t-test calculated [based on (Pauly 1984)]; GT\* growth type (A+, Positive allometric growth).



L'analyse des relations longueur-poids chez 180 anguilles capturée au lac Tonga a montré que le coefficient d'allométrie (b) est plus élevé que 3 (b=3.22), cela se traduit par une allométrie majorante, autrement dit, une croissance légèrement plus rapide en poids qu'en taille; Tandis que le coefficient de détermination élevé ( $R^2 = 0,96$ ) et la signification statistique ( $t \text{ cal} = 4,89$ ) confirment la robustesse de cette relation, tandis que le grade de croissance A+ reflète des conditions environnementales très favorables. Ces résultats sont cohérents avec l'équation de von Bertalanffy, mettant l'accent sur le développement équilibré des anguilles dans un environnement favorable.

**1.5 Relation logarithmique taille-poids et qualité de croissance :**

Le **tableau 06** présente deux versions de la relation entre la longueur et le poids des anguilles du lac Tonga : une équation multiplicative et une version logarithmique.

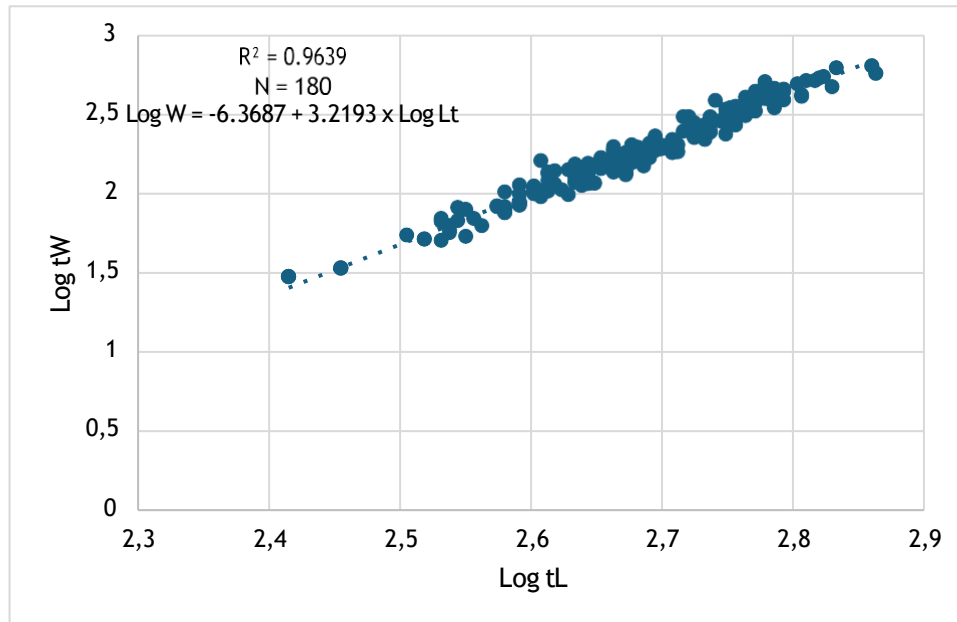
**Tableau 06 :** Paramètres et équations de la relation longueur-poids pour la population d'anguilles du lac Tonga

$W=a*TL^b$	$\text{Log } W=\text{Log } a+b*\text{Log } TL$
<b>Combined</b> $W = 4.29 *TL^{3.219}$	$\text{Log } W= -6.3687+3.219*\text{Log } TL \quad (R^2=0.96)$

L'équation de régression ( $W = 4,29 \times TL^{3,219}$  et  $\log W = -6,3687 + 3,219 \times \log TL$ ) montre que le poids corporel des anguilles du lac Tonga augmente plus rapidement que le cube de leur longueur, indiquant une croissance allométrique positive. L'indice 3,219 et le coefficient de détermination  $R^2 = 0,96$  confirment la relation étroite entre longueur et poids, expliquant 96% de la variation de poids. Ces résultats sont cohérents avec un indice de performance de croissance élevé ( $\emptyset' = 5,519$ ), mettant l'accent sur des conditions environnementales favorables permettant une croissance harmonieuse et optimale des anguilles.



La **figure 42** illustre la relation logarithmique entre la longueur totale (Log TL) et le poids (Log W) des anguilles du lac Tonga, avec une régression linéaire pour modéliser cette relation.



**Figure 42** : Relation logarithmique entre la longueur totale et le poids des anguilles du lac Tonga avec ajustement de régression linéaire

L'équation de régression  $\log W = -6.3687 + 3.2193 \times \log TL$  est représentée par la ligne de tendance, et le coefficient de détermination  $R^2 = 0.9639$  indique un ajustement très fort, montrant que cette relation est bien modélisée pour cette population. L'exposant de 3.219 indique une croissance allométrique positive, dans laquelle le poids augmente plus rapidement que le cube de la longueur, suggérant des conditions de croissance favorables.



## 2- Caractéristique de la population d'anguilles de l'estuaire de la Mafrag :

Pour cette étude ; un total de 97 spécimens a été examiné, la sous-population d'Anguilla présentant une longueur totale allant de 490-860 mm et un poids de 204-1289 g, avec un âge de 19-93 mois ; au niveau de l'estuaire de Mafrag (Figure 43).

### 2-1 Proportion des effectifs des classes de tailles des anguilles collectées dans la Mafrag :

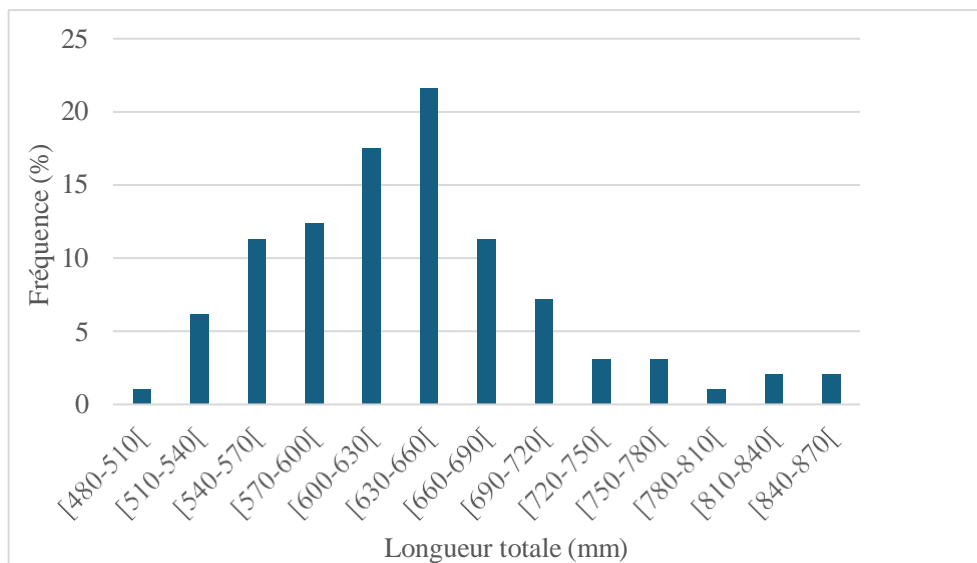


Figure 43 : Effectif observé au sein de différentes classes de taille des anguilles (*Anguilla anguilla*) de la Mafrag

L'histogramme illustre la répartition en pourcentage des différentes longueurs mesurées chez les anguilles de l'estuaire de la Mafrag, mettant en évidence les fréquences de chaque classe de taille. La distribution des tailles est concentrée autour de la classe de taille 630-660 mm, qui représente environ 20 % de la population, constituant ainsi la classe de taille la plus fréquente. Cette concentration est suivie par les classes de taille 600-630 mm et 660-690 mm, qui présentent des fréquences respectives de près de 15 % et 12 %. Ensemble, ces classes de taille dominent la distribution, formant le noyau central de la population étudiée dans cet estuaire.

En observant les classes de taille plus petites, on note une augmentation progressive de la fréquence des individus entre 510-540 mm et 600-630 mm, atteignant un maximum dans la classe 630-660 mm. Les classes de taille 510-540 mm, 540-570 mm et 570-600 mm montrent des fréquences modérées, respectivement autour de 5 %, 8 %, et 10 %, indiquant une présence notable d'individus de taille moyenne inférieure.



À partir de la classe de taille 660-690 mm, la fréquence commence à diminuer progressivement. Les classes de taille supérieures, telles que 690-720 mm et 720-750 mm, montrent des fréquences plus faibles, de l'ordre de 5 à 7 %. Au-delà de la classe 750 mm, les fréquences continuent de décroître, avec des valeurs comprises entre 1 et 3 % pour les classes de tailles les plus grandes (780-810 mm à 840-870 mm). Cela témoigne d'une faible proportion d'individus de grande taille dans la population de l'estuaire.

La distribution générale montre une structure centrée autour des classes de taille intermédiaires (600-690 mm), avec une diminution progressive des fréquences de chaque côté de ce noyau central. Cette forme de distribution suggère une population où les individus de taille moyenne prédominent, tandis que les tailles extrêmes, petites et grandes, sont moins représentées.

## 2-2 Paramètres de croissance selon Von Bertalanffy (méthode ELEFEN-I) :

**Tableau 07** : Paramètres de croissance selon le modèle de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles de l'estuaire de la Mafrag

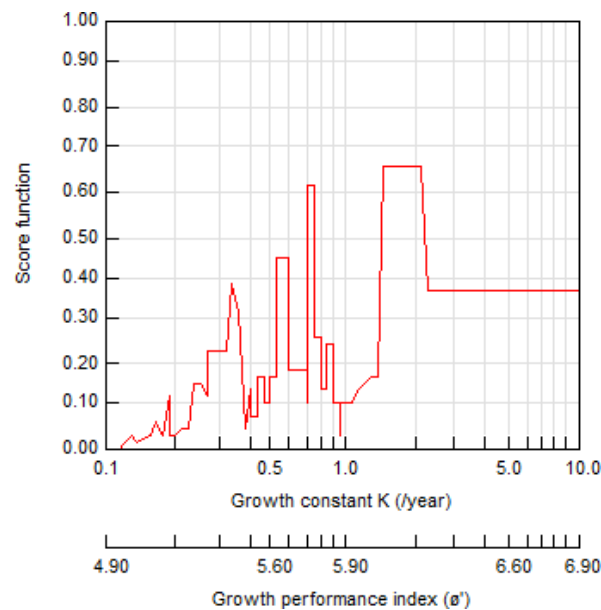
n	$L_{\infty}$ (mm)	K (year <sup>-1</sup> )	$t_0$ (year)	$\emptyset'$	Lmin-Lmax
Combined 97	897.75	1.50	-0.041	6.082	490-860

- **Longueur asymptotique ( $L_{\infty} = 897.75$  mm)** : Cette valeur représente la taille maximale théorique que les anguilles de la Mafrag pourraient atteindre dans des conditions idéales, soit près de 900 mm.
- **Coefficient de croissance ( $K = 1.50$ )** : Le coefficient K de 1.50 suggère une croissance rapide dans cette population, bien plus élevée que celle observée au lac Tonga (0.54). Ce K élevé signifie que les anguilles de la Mafrag atteignent leur taille optimale très rapidement.
- **Âge théorique ( $t_0 = -0.041$  ans)** : Le paramètre  $t_0$  est proche de zéro (-0.041), ce qui signifie que le modèle de croissance est bien aligné avec les données observées pour cette population dès les premiers stades de vie.
- **Indice de performance de croissance ( $\emptyset' = 6.082$ )** : L'indice  $\emptyset'$  élevé de 6.082 est un indicateur d'une performance de croissance remarquable, supérieure à celle des anguilles du lac Tonga ( $\emptyset' = 5.519$ ).



- **Intervalle de tailles observées ( $L_{min}$ - $L_{max}$  = 490-860 mm) :** Les tailles mesurées dans cet échantillon varient de 490 à 860 mm, en cohérence avec la distribution des tailles observée dans la figure précédente. La taille maximale observée (860 mm) est légèrement inférieure à la longueur asymptotique théorique ( $L_{\infty}$  = 897.75 mm).

La **figure 44** représente comment les valeurs du coefficient de croissance  $K$  et de l'indice de performance de croissance  $\emptyset'$  s'ajustent aux données de croissance des anguilles de l'estuaire de la Mafrag.



**Figure 44 :** Relation entre le coefficient de croissance et l'indice de performance de croissance des anguilles de l'estuaire de la Mafrag (Méthod d'ELEFEN-I)

La fonction de score indique la qualité de l'ajustement pour chaque combinaison de  $K$  et  $\emptyset'$ , permettant d'identifier les valeurs optimales pour modéliser la croissance de cette population.

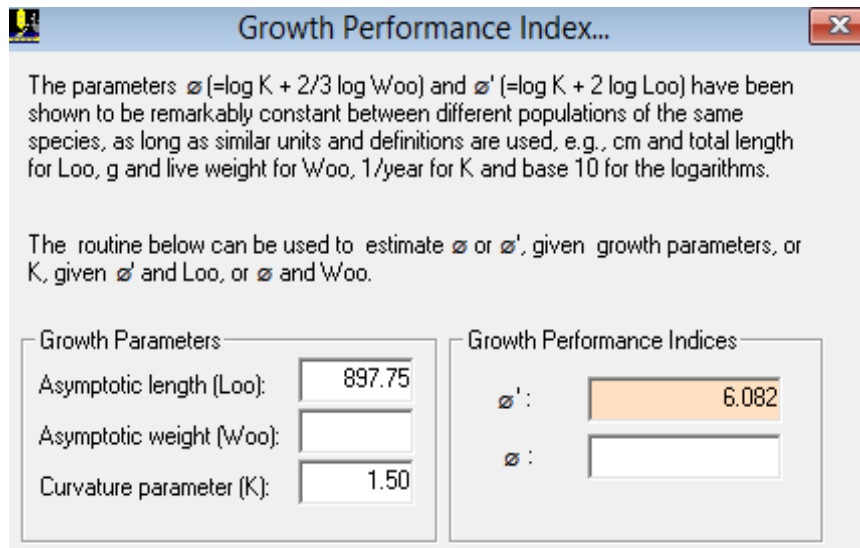
- **Valeurs optimales de  $K$  et  $\emptyset'$  :** Le pic de la fonction de score se situe autour de  $K=1.50$  et  $\emptyset'=6.082$ , confirmant que ces valeurs fournissent le meilleur ajustement aux données de l'estuaire de la Mafrag. Cela signifie que ces valeurs représentent au mieux la dynamique de croissance des anguilles dans cet estuaire. En pratique, le coefficient de croissance élevé ( $K=1.50$ ) suggère une croissance rapide, permettant aux anguilles d'atteindre leur taille optimale dans un environnement où les conditions semblent favoriser une croissance rapide jusqu'à une taille intermédiaire.



- **Plage de tolérance :** La fonction de score montre également une plage de tolérance pour les valeurs proches de  $K=1.50$  et  $\Phi'=6.082$ . Cette tolérance pourrait refléter la variabilité naturelle dans la croissance des individus au sein de la population, influencée par des différences locales de disponibilité en ressources, typiques des environnements estuariens.

### 2-3 Paramètres de croissance des anguilles du Mafrag (logiciel FISAT II) :

La **figure 45** présente les principaux paramètres de croissance des anguilles de l'estuaire de la Mafrag : la longueur asymptotique ( $L_{\infty}$ ), le coefficient de croissance ( $K$ ), et l'indice de performance de croissance ( $\Phi'$ ).



**Figure 45 :** Indice de performance de croissance ( $\Phi'$ ) et paramètres asymptotiques des anguilles de l'estuaire de la Mafrag (logiciel FISAT II)

Ces valeurs permettent de mieux comprendre le développement de cette population dans son environnement spécifique et confirment les observations de la structure de taille.

L'équation de croissance (Tableau 6) de Von Bertalanffy est un outil essentiel pour modéliser la relation entre l'âge et la taille des anguilles de l'estuaire de la Mafrag, en prenant en compte des paramètres de croissance spécifiques à cette population.



Tableau 08 : Équation de croissance de Von Bertalanffy pour la population d'anguilles de l'estuaire de la Mafrag

Von Bertalanffy Equation	
Combined	$L_t = 897.75 [1 - e^{-1.50(t + 0.041)}]$

- **Longueur asymptotique ( $L_\infty = 897.75$  mm) :** Ce paramètre représente la taille maximale théorique que les anguilles de la Mafrag peuvent atteindre dans des conditions idéales.
- **Coefficient de croissance ( $K = 1.50$ ) :** Le coefficient K de 1.50 suggère une croissance très rapide dans cette population, ce qui est cohérent avec les conditions dynamiques de l'estuaire.
- **Ajustement d'âge ( $t_0 = 0.041$ ) :** Le paramètre  $t_0$  ajuste l'équation pour correspondre aux données observées dès les premiers stades de vie. Sa faible valeur (0.041) montre que le modèle est bien aligné avec les tailles mesurées dans les premiers âges de cette population.

L'équation de Von Bertalanffy offre une vue d'ensemble de la dynamique de croissance des anguilles dans l'estuaire de la Mafrag. Elle met en évidence une croissance rapide vers une taille intermédiaire optimale, et une longueur maximale théorique rarement atteinte en raison des contraintes locales.

2-4 Relation taille-poids et qualité de croissance :

Le tableau 09 présente les paramètres de la relation entre la longueur et le poids des anguilles de l'estuaire de la Mafrag, en utilisant une régression pour décrire cette relation.

Tableau 09 : Paramètres de régression longueur-poids et qualité de croissance des anguilles de l'estuaire de la Mafrag

	n	a	b	R <sup>2</sup>	t cal	significance	GT
Combined	97	3.33	3.275	0.844	2.16	+	A <sup>+</sup>

n\* sample size, a\* intercept, b\* slope, R<sup>2</sup>\* coefficient of determination, tcal\* t-test calculated [based on (Pauly 1984)]; GT\* growth type (A+, Positive allometric growth).



Ces résultats montrent que la croissance de 97 anguilles capturées à l'estuaire de la Mafrag suit une relation taille-poids légèrement allométrique, avec des paramètres de régression ( $a = 3.33$  et  $b = 3.275$ ) indiquant une augmentation du poids plus rapide que le cube de la longueur. Le coefficient de détermination ( $R^2 = 0.844$ ) montre que 84,4 % de la variabilité du poids est expliquée par la longueur, confirmant un bon ajustement du modèle. La significativité statistique ( $t_{cal} = 2.16$ ) et la classe de croissance A+ soulignent des conditions environnementales favorables, avec un indice de performance de croissance élevé ( $\emptyset' = 6.082$ ), garantissant une croissance stable et optimale pour cette population.

### 2.5 Relation logarithmique taille-poids et qualité de croissance :

Le **tableau 10** présente deux versions de la relation entre la longueur et le poids des anguilles de l'estuaire de la Mafrag : une équation multiplicative et une version logarithmique.

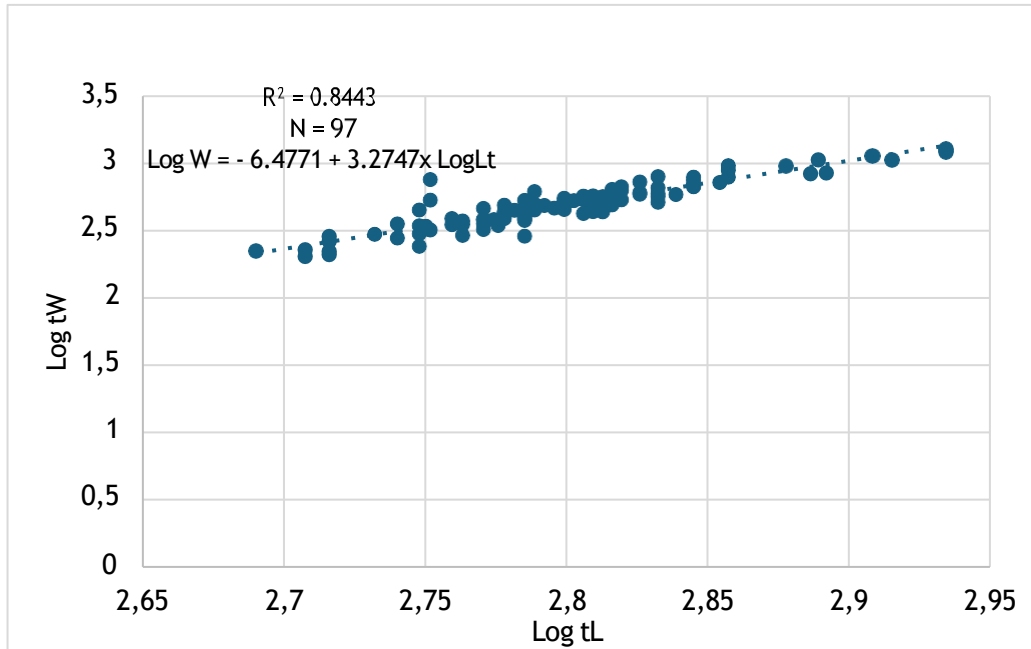
**Tableau 10** : Paramètres et équations de la relation longueur-poids pour la population d'anguilles de la Mafrag

$W=a*TL^b$	$Log W=Log a+b*Log TL$
<b>Combined</b> $W = 3.33 *TL^{3.274}$	$Log W = -6.477+3.275*Log TL$ ( $R^2=0.84$ )

L'équation de régression ( $W = 3,33 \times TL^{3,274}$  et  $\log W = -6,477 + 3,275 \times \log TL$ ) montre que le poids des anguilles de l'estuaire de Mafrag augmente plus vite que le cube de leur longueur, indiquant une croissance allométrique positive. Le coefficient de détermination  $R^2 = 0,84$  montre une bonne adéquation de la relation longueur-poids, expliquant 84% de la variation de poids. Ces résultats sont cohérents avec un indice de performance de croissance élevé ( $\emptyset' = 6,082$ ), confirmant des conditions favorables et une croissance stable, équilibrée et optimale des anguilles estuariennes.



La **figure 46** illustre la relation logarithmique entre la longueur totale (Log TL) et le poids (Log W) des anguilles de l'estuaire de la Mafrag, avec une régression linéaire pour modéliser cette relation.



**Figure 46 :** Relation logarithmique entre la longueur et le poids des anguilles de l'estuaire de la Mafrag

L'équation de régression  $\log W = -6.477 + 3.274 \times \log TL$ , avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0.8443$ , montre que la relation taille-poids des anguilles de l'estuaire de la Mafrag est bien modélisée. L'exposant de 3.274 indique une croissance allométrique positive, dans laquelle le poids augmente plus rapidement que le cube de la longueur, suggérant des conditions de croissance favorables. Bien que la dispersion des points soit modérée, la relation reste stable et permet de prédire le poids en fonction de la longueur. Ces résultats confirment une croissance optimisée et stable dans un environnement propice au développement des anguilles.



### 1- Stades d'Argenture

Selon (Durif, 2004), le **tableau 11** nous permet de comprendre la relation entre les phases de migration et les stades de maturité sexuelle chez les anguilles. Les anguilles résidentes sont généralement à des stades de maturité sexuelle moins avancés (I, FII, FIII), tandis que les pré migrants et les migrantes sont à des stades plus avancés (FIV, FV, MII). Cela reflète le fait que la migration est étroitement liée à la maturation sexuelle, les anguilles migrantes étant celles qui ont atteint un stade de développement reproducteur leur permettant de se reproduire en mer.

**Tableau 11** : relation entre les phases de migration et les stades de maturité sexuelle chez les anguilles selon (Durif, 2004).

Phase de migration	Stades de maturité sexuelle	Description
Résident	I (indifférencié)	Anguilles immatures, sexe non déterminé, organes reproducteurs non différenciés.
	FII (femelle)	Femelles en début de développement des ovaires, pas encore matures.
	FIII (femelle)	Femelles en phase de maturation, ovaires en développement avancé.
Pré migrant	FIV (femelle)	Femelles proches de la maturité sexuelle, ovaires bien développés.
	MI (mâle)	Mâles en développement des testicules, pas encore pleinement matures.
Migrant	FV (femelle)	Femelles pleinement matures, prêtes à migrer et à se reproduire.

Dans cette étude, le **tableau 12** présente les moyennes et les écarts-types de la longueur totale (Lt), du poids (P) et de l'âge des anguilles européennes (*Anguilla anguilla*) en fonction de leur stade de développement et de leur degré d'argenture, conformément à la classification de Durif et al. (2005). Cette classification distingue trois grandes phases du cycle de vie : résidente, pré-migrante et migrante, chacune correspondant à un ou plusieurs stades de maturité sexuelle.



Au lac Tonga, les anguilles sont majoritairement à la phase résidente, avec une prédominance des stades I (N = 97) et FII (N = 69). Le stade I regroupe des individus immatures, au sexe encore indéterminé, dont les organes reproducteurs ne sont pas différenciés. Au stade FII, les femelles commencent le développement de leurs ovaires, bien que n'étant pas encore matures. Entre ces deux stades, une croissance marquée est observée : la longueur moyenne passe de  $423,82 \pm 60,29$  mm à  $567,03 \pm 58,96$  mm, le poids de  $129,66 \pm 56,67$  g à  $332,84 \pm 119,73$  g, et l'âge moyen de  $45,90 \pm 11,88$  à  $56,58 \pm 9,75$  mois. Les stades plus avancés, notamment FIII (femelles en phase de maturation ovarienne avancée), FIV (femelles proches de la maturité) et FV (femelles matures prêtes à migrer), y sont très faiblement représentés. On note également la présence de huit mâles au stade MII, correspondant à la phase pré-migrante, caractérisée par des testicules en développement mais non encore pleinement matures ; ces individus présentent une taille moyenne de  $472,50 \pm 64,14$  mm et un âge moyen de  $51,25 \pm 11,73$  mois.

**Tableau 12 :** Valeur Moyenne et écart-type de la longueur, du poids et de l'âge des anguilles en fonction du stade de vie et de l'argenture (Durif et al., 2005).

		I	FII	FIII	FIV	FV	MI
Lac Tonga	N	97	69	1	-	5	8
	P (g)	$129,66 \pm 56,67$	$332,84 \pm 119,73$	579	-	$335 \pm 29,20$	$193 \pm 76,14$
	Lt (mm)	$423,82 \pm 60,29$	$567,03 \pm 58,96$	730	-	$570 \pm 18,37$	$472,50 \pm 64,14$
	Age (mois)	$45,90 \pm 11,88$	$56,58 \pm 9,75$	93	-	$60,60 \pm 5,37$	$51,25 \pm 11,73$
Estuaire de Mafragh	N	-	-	19	9	68	1
	P (g)	-	-	$507,84 \pm 166,44$	$1011,67 \pm 184,81$	$480,41 \pm 161,34$	224
	Lt (mm)	-	-	$635,53 \pm 57,01$	$749,44 \pm 93,12$	$621,15 \pm 60,29$	490
	Age (mois)	-	-	$57 \pm 11,31$	$53,67 \pm 12,14$	$52,72 \pm 13,58$	33

À l'inverse, dans l'estuaire de Mafragh, les anguilles se trouvent principalement à des stades avancés de maturation. La population est composée à 99 % de femelles, réparties entre les stades FIII, FIV et FV, témoignant d'une nette dominance de la phase pré-migrante à migrante. Ces anguilles présentent des tailles et des poids significativement supérieurs, en particulier au stade FIV (Lt =  $749,44 \pm 93,12$  mm ; P =  $1011,67 \pm 184,81$  g), indiquant des ovaires pleinement



développés et une préparation imminente à la migration. Au stade FV, les femelles atteignent leur pleine maturité sexuelle, prêtes à entamer leur migration vers les zones de reproduction. L'âge moyen dans cette population est relativement homogène entre les stades FIII et FV, oscillant entre 52 et 57 mois, ce qui suggère une transition rapide vers la maturité dans cet environnement estuarien plus dynamique.

**Tableau 13 :** Variables morphologiques et anatomiques (valeurs moyennes et écart-type) des anguilles en fonction du stade de vie et de l'argenture (Durif et al., 2005, Durif et al., 2009).

		Les étapes de l'argenture					
		SI	SFII	SFIII	SFIV	SFV	SMII
Lac Tonga	OI (%)	6,24 ± 2,01	9,15 ± 2,27	12,99	-	8,49 ± 0,68	12,73 ± 1,56
	FI (%)	4,76 ± 0,70	4,97 ± 0,43	5,48	-	5,47 ± 0,31	5,55 ± 0,37
	GSI (%)	0,21 ± 0,19	0,54 ± 0,32	0,35	-	0,68 ± 0,40	0,68 ± 0,66
	HSI (%)	1,51 ± 0,48	1,26 ± 0,38	1,92	-	1,04 ± 0,08	1,15 ± 0,21
	GIs (%)	2,15 ± 0,47	2,10 ± 0,69	1,80	-	1,66 ± 0,42	1,11 ± 0,44
Estuaire de Mafragh	OI (%)	-	-	8,31 ± 0,84	11,26 ± 1,80	11,04 ± 1,61	10,26
	FI (%)	-	-	4,61 ± 0,42	5,21 ± 0,29	5,25 ± 0,39	5,1
	GSI (%)	-	-	0,50 ± 0,14	0,93 ± 0,34	0,94 ± 0,54	4,15
	HSI (%)	-	-	1,52 ± 0,34	1,29 ± 0,27	1,54 ± 0,31	0,45
	GIs (%)	-	-	3,22 ± 0,49	1,66 ± 0,87	2,37 ± 1,05	1,5

Le **tableau 13** relatif aux variables morphologiques et anatomiques met en évidence l'évolution des indices biologiques clés des anguilles européennes (*Anguilla anguilla*) selon leur stade de vie et leur degré d'argenture, en comparant les populations du lac Tonga et de l'estuaire de Mafragh. Au lac Tonga, on observe une augmentation progressive de l'indice oculaire (OI) entre les stades résidents SI (6,24 ± 2,01 %) et SFIII (12,99 %), traduisant une adaptation visuelle croissante à la migration, avant de décroître légèrement au stade SFV (8,49 ± 0,68 %), puis de remonter chez les mâles pré-migrants (SMII) (12,73 ± 1,56 %). L'indice de finesse (FI), qui reflète l'allongement du corps, reste globalement stable entre 4,76 % et 5,55 %, indiquant une morphologie relativement constante durant le développement. L'indice gonadosomatique (GSI), indicateur du développement des gonades, augmente avec l'avancement des stades, passant de 0,21 ± 0,19 % au stade SI à 0,68 ± 0,40 % chez les femelles matures (SFV), et atteignant la même valeur moyenne chez les mâles SMII, témoignant d'une activité



reproductive croissante. À l'inverse, l'indice hépatosomatique (HSI), qui renseigne sur les réserves énergétiques hépatiques, diminue au fil des stades : de  $1,51 \pm 0,48$  % à SI à  $1,04 \pm 0,08$  % à SFV, ce qui suggère une mobilisation des réserves pour la maturation. L'indice gastrique (GIs) suit une tendance similaire, décroissant de  $2,15 \pm 0,47$  % à  $1,11 \pm 0,44$  %, traduisant une vidange progressive de l'appareil digestif avant la migration.

Dans l'estuaire de Mafragh, seules les anguilles aux stades avancés (SFIII à SFV et SMII) ont été recensées. Les femelles pré-migrantes (SFIV) présentent les valeurs les plus élevées de l'OI ( $11,26 \pm 1,80$  %), confirmant leur préparation à la migration. Le GSI augmente fortement entre les stades SFIII ( $0,50 \pm 0,14$  %) et SFV ( $0,94 \pm 0,54$  %), marquant l'achèvement de la maturation ovarienne. De manière notable, l'unique mâle SMII observé présente un GSI de 4,15 %, nettement supérieur aux valeurs relevées au lac Tonga, ce qui pourrait indiquer une variabilité individuelle ou une accélération locale du développement testiculaire. Le HSI reste relativement stable entre les stades, sauf chez le mâle SMII (0,45 %), suggérant une forte utilisation des réserves. Enfin, l'indice gastrique tend à décroître du stade SFIII ( $3,22 \pm 0,49$  %) au SMII (1,5 %), confirmant également une réduction de l'activité digestive à l'approche de la migration. Ces résultats montrent une différence marquée entre les deux sites : tandis que le lac Tonga abrite majoritairement des individus en phase résidente, l'estuaire de Mafragh est caractérisé par des individus en phase terminale de maturation, prêts à migrer, avec des adaptations morpho-anatomiques correspondant à cette transition.



**Axe 2 : Analyse du régime alimentaire chez l'anguille européenne**

**1. Analyse de l'état nutritionnel des anguilles échantillonnées :**

Le **Tableau 14** présente les résultats de l'analyse des contenus digestifs des anguilles capturées sur deux sites, Tonga et Mafragh. Ils concernent, en particulier le nombre de tubes digestifs examinés (NTDE), le nombre de tubes digestifs vides (NTDV) et de tubes digestifs pleins (NTDP), ainsi que le coefficient de vacuité (CV%), qui indique la proportion de tubes digestifs vides. À Tonga, 180 tubes digestifs ont été examinés et 74 d'entre eux étaient vides ce qui représente 41,11 %. A Mafragh, 97 tubes digestifs ont été analysés, et on a découvert que 19 tubes étaient vides. Cela signifie que les anguilles de Mafragh se nourrissent plus souvent que celles de Tonga.

**Tableau 14 :** Résultats de l'analyse des contenus digestifs des anguilles capturées sur deux sites, Tonga et Mafragh

	<b>Tonga</b>	<b>Mafragh</b>
<b>NTDE</b>	180	97
<b>NTDV</b>	74	19
<b>CV%</b>	41,11	19,59
<b>NTDP</b>	106	78
<b>Fi% (Poisson)</b>	44,34	20,51
<b>Fi% (Végétation)</b>	28,30	6,41
<b>Fi% (Insecte)</b>	32,08	65,38
<b>Fi% (Crustacée)</b>	18,87	43,59

En ce qui concerne les fréquences des proies la composition du régime alimentaire varie entre les deux sites. À Tonga, les poissons 44,34 % et les insectes 32,08 % dominent le régime, tandis qu'à la Mafragh, les insectes 65,38 % et les crustacés 43,59 % sont les proies les plus fréquentes. La végétation est également consommée, mais à une fréquence plus faible, surtout au Mafragh 6,41 % par rapport à Tonga 28,30 %. Il semble donc que les différences reflètent des disponibilités alimentaires distinctes entre les deux sites et aux diverses mangroves, celles de Tonga en particulier où les forêts restent moins fréquentées par des prédateurs carnivores.

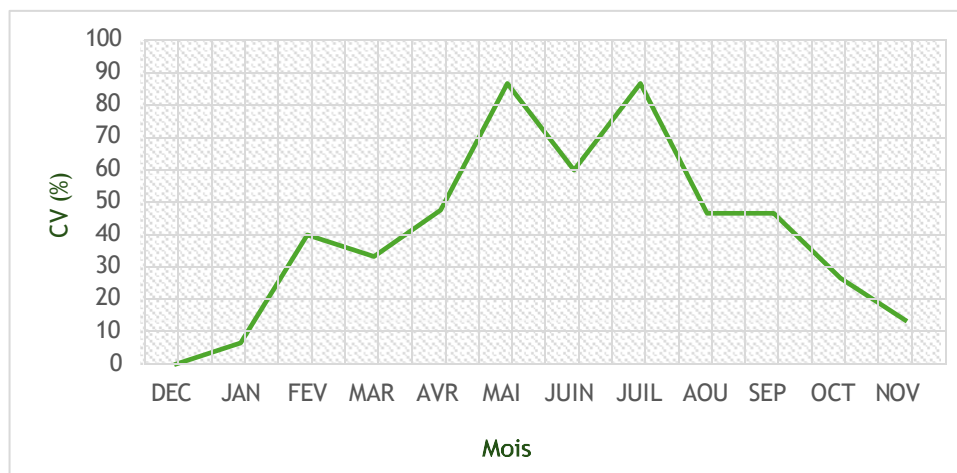


### 1.1 Coefficient de vacuité :

Les valeurs moyennes obtenues pendant notre cycle d'étude du régime alimentaire quelles soient durant l'été ou l'hiver ne dépassent pas 42%. Les 74 tubes digestifs vides observés sur les 180 examinés ce qui nous a donné un coefficient de vacuité dans l'ordre de 41,11%. D'un autre côté, dans l'estuaire du Mafragh, sur les 97 anguilles examinées seules 19 anguilles présentent des tubes digestifs vides ce qui implique que le coefficient de vacuité dans l'ordre de 19,59 %.

#### ✓ Variations mensuelles du coefficient de vacuité (CV%)

L'évaluation de la valeur mensuelle de ce coefficient chez les anguilles du lac de Tonga a révélé des fluctuations importantes au cours de l'année **Fig.47**. En mois de décembre par exemple, on a enregistré une variabilité nulle du taux de CV%. Cependant, en janvier, le taux de CV% a passé 6.67%, un changement léger dans les valeurs mensuelles. Cette tendance s'est accentuée d'un mois à l'autre, ou en mois de mai, un seuil a été atteint avec un taux du CV% de 86.67. Il s'est maintenu à un taux élevé pendant les mois de juin et juillet, ce qui semble signaler que les conditions vont continuer à changer. Cependant, à partir du mois d'août, le CV% a commencé à baisser dès lors qu'en novembre, nous avons connu notre taux min 13.33 %. Cette période semble signifier un changement stable.



**Figure 47 :** Évolution mensuelle du coefficient de vacuité chez les anguilles du lac Tonga



✓ Variation du coefficient de vacuité (CV%) en fonction des classes de taille :

L'évolution du coefficient de vacuité en fonction de la taille des anguilles capturées dans le lac Tonga, montre que la valeur la plus basse du pourcentage 34,32 % est chez les individus de la classe de taille moyenne [45-55[ (Fig.48). Les valeurs les plus élevées sont 66,67 et 57,14 % pour les classes de taille [25-35[ et [65-75[. Chez les anguilles de l'estuaire du Mafragh, la plus élevée pourcentage de coefficient de vacuité est pour les individus de classe moyenne [60-70[: 34,48 %, contre négative 0 % pour la plus petite classe de taille [40-50[ et la plus grande [80-90[.

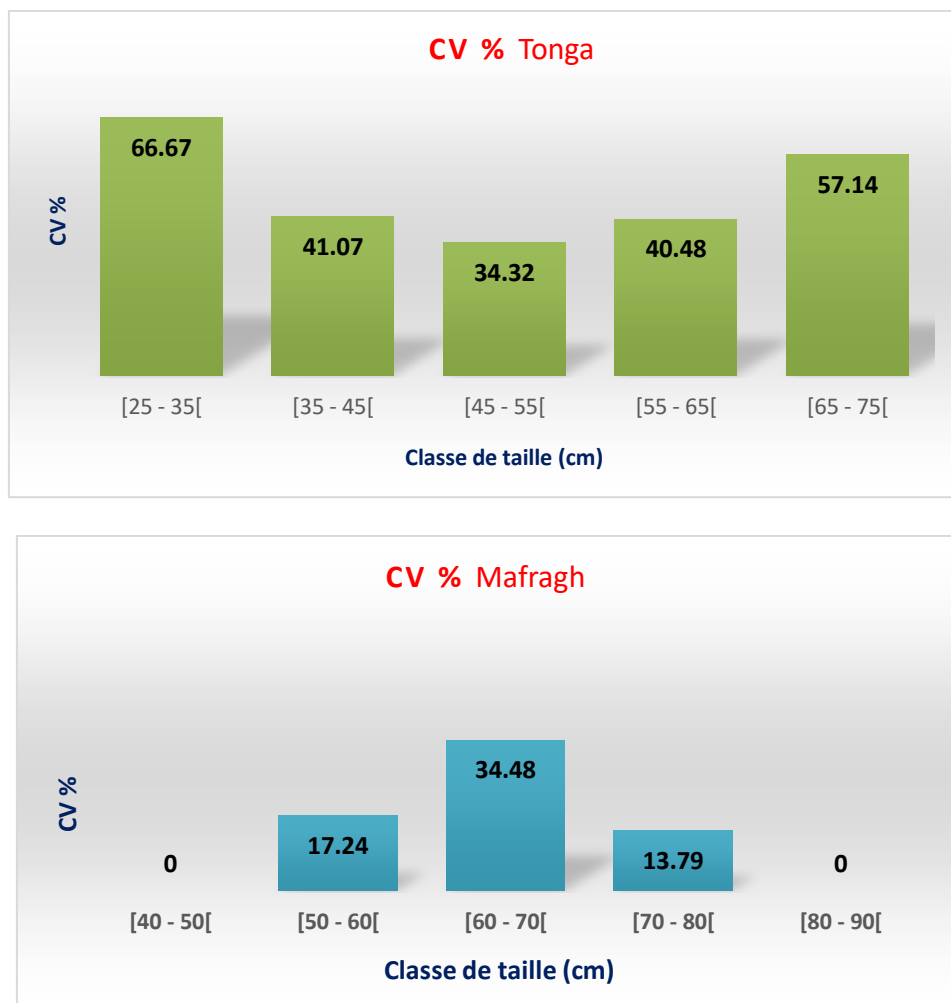
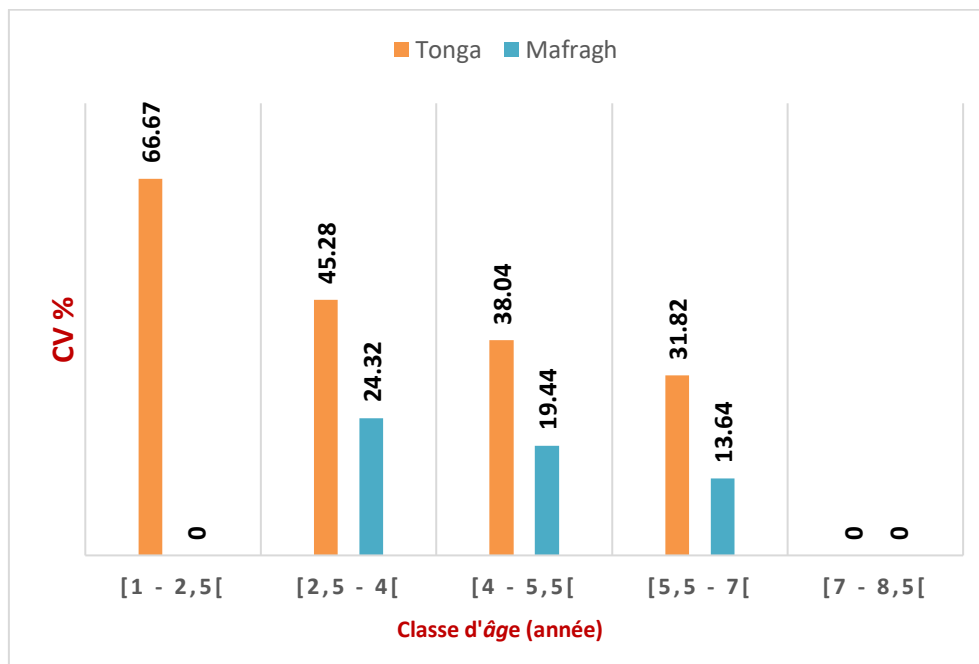


Figure 48 : Évolution du coefficient de vacuité en fonction de la classe de taille des anguilles des deux sites.



✓ **Variation du coefficient de vacuité (CV%) en fonction des classes d'âge :**

L'évolution du coefficient de vacuité en fonction de l'âge des anguilles capturées dans les deux sites ont la même allure, comme l'illustre l'émergence de la valeur la plus basse qui est 0% chez les individus les plus âgés de la classe d'âge [7 – 8,5[(Fig. 49). Par ailleurs une tendance inverse est visible entre les valeurs en pourcentages de coefficient de vacuité et l'âge des anguilles, à l'exception de la plus petite classe d'âge [1 – 2,5[ où une seule anguille a été capturée dans la Mafragh affichent une valeur négative.



**Figure 49 :** Évolution du coefficient de vacuité en fonction de la classe d'âge des anguilles des deux sites.

**1.2 Fréquences d'apparition des proies (F%) :**

Les résultats de l'analyse qualitative du contenu du tube digestif des anguilles des deux plans d'eau font mention des proies d'origine animale et végétale (Fig. 50). Pour les proies d'origine animale, il s'agit des vertébrés telles que les poissons et des invertébrés tels que des crustacés et des insectes. Quant aux proies d'origine végétale, elles sont principalement constituées d'algues.

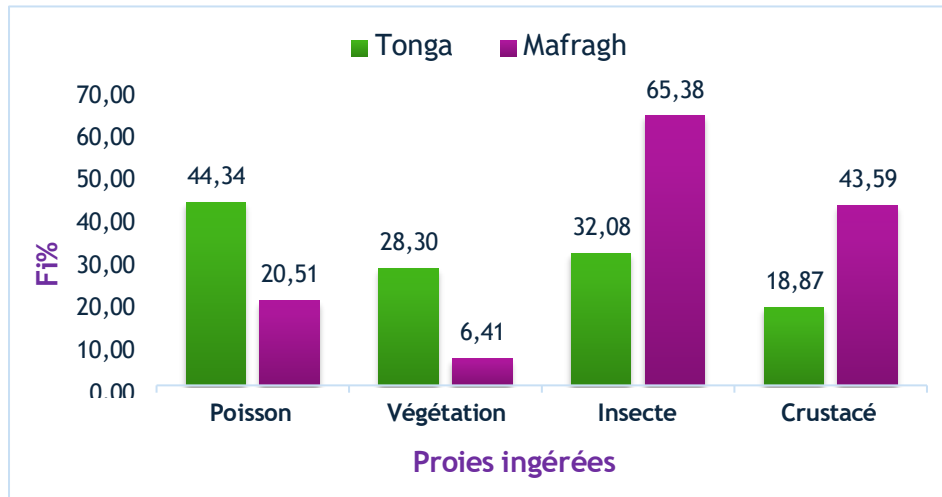


Figure 50 : Fréquences des proies ingérées par l'anguille capturée aux deux plans d'eaux.

Il est également notable que les proportions de ces proies varient d'un plan d'eau à l'autre. Durant cette étude, nous avons noté que l'anguille manifeste une nette préférence pour les proies d'origine animale. Les proies végétales ne représentent que 28,3% pour celles du lac Tonga et 6,41% pour les anguilles de la Mafragh.

✓ *Proportions des proies ingérées par les anguilles des différentes classes de taille :*

L'analyse des proportions de proies ingérées par les anguilles dans différentes classes de taille révèle des schémas fascinants de leurs préférences alimentaires à divers stades de leur développement. **Fig. (51)**. Chez les anguilles capturées dans le lac Tonga, les proportions des proies montrent des changements en fonction de la taille du poisson. Dans la classe de taille [25 – 35[, les anguilles montrent une nette préférence pour les poissons et les insectes, représentant tous les deux 50 % de leur alimentation. Cependant, aucune consommation de plantes ou de crustacés n'a été observée. Dans la classe [35 – 45[, la végétation domine de 48,48 % du régime alimentaire, suivies par les poissons et les insectes. Les crustacés sont également consommés, mais dans une proportion moindre de 9,09 %. Les anguilles de la classe [45 - 55[préfèrent toujours les poissons, qui représentent près de 49 % de leur régime, suivis de végétation, d'insectes et de crustacés. La classe de taille [55 - 65[confirme une forte consommation de poisson, à 52%, et d'insectes, à 36%. Enfin, dans la classe [65 - 75[, le manque de consommation de poisson est compensé par la consommation exclusive de 100 % de crustacés, mettant en évidence la diversification des préférences alimentaires au fur et à mesure de la croissance des anguilles.

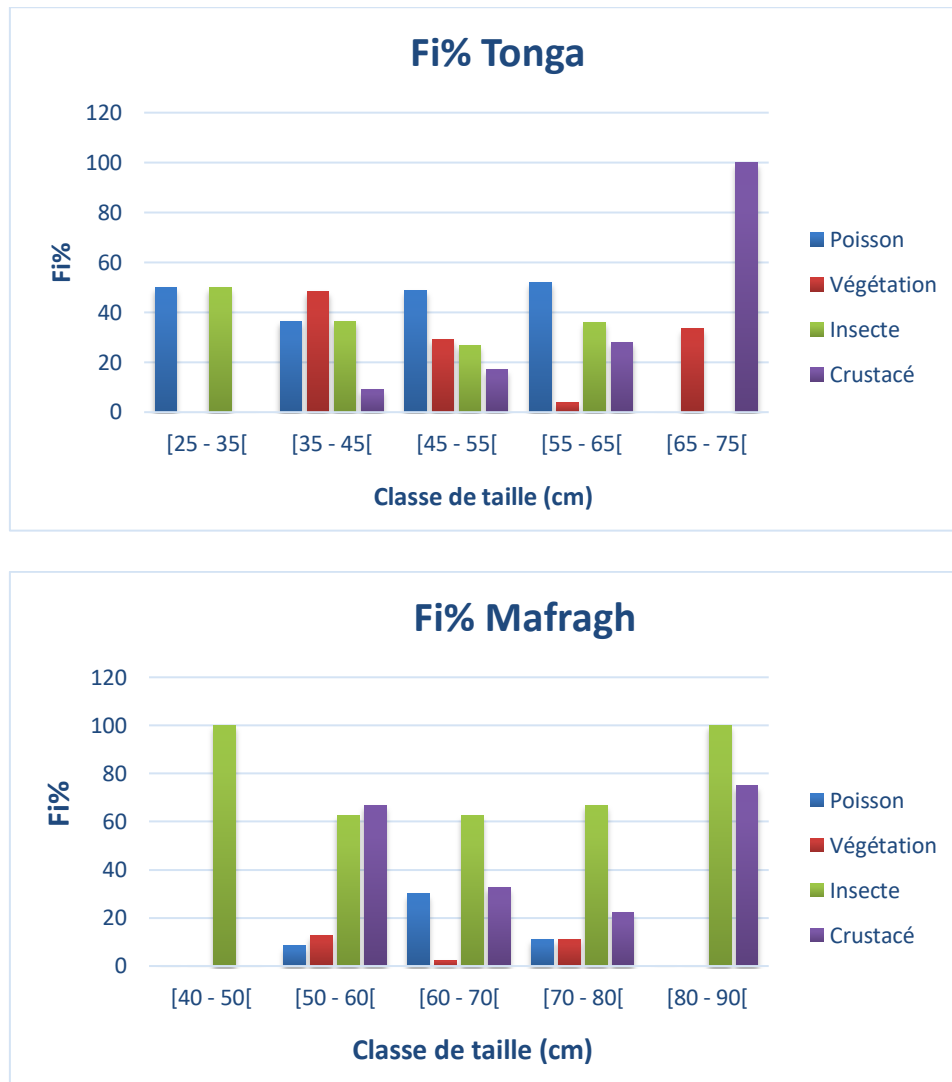
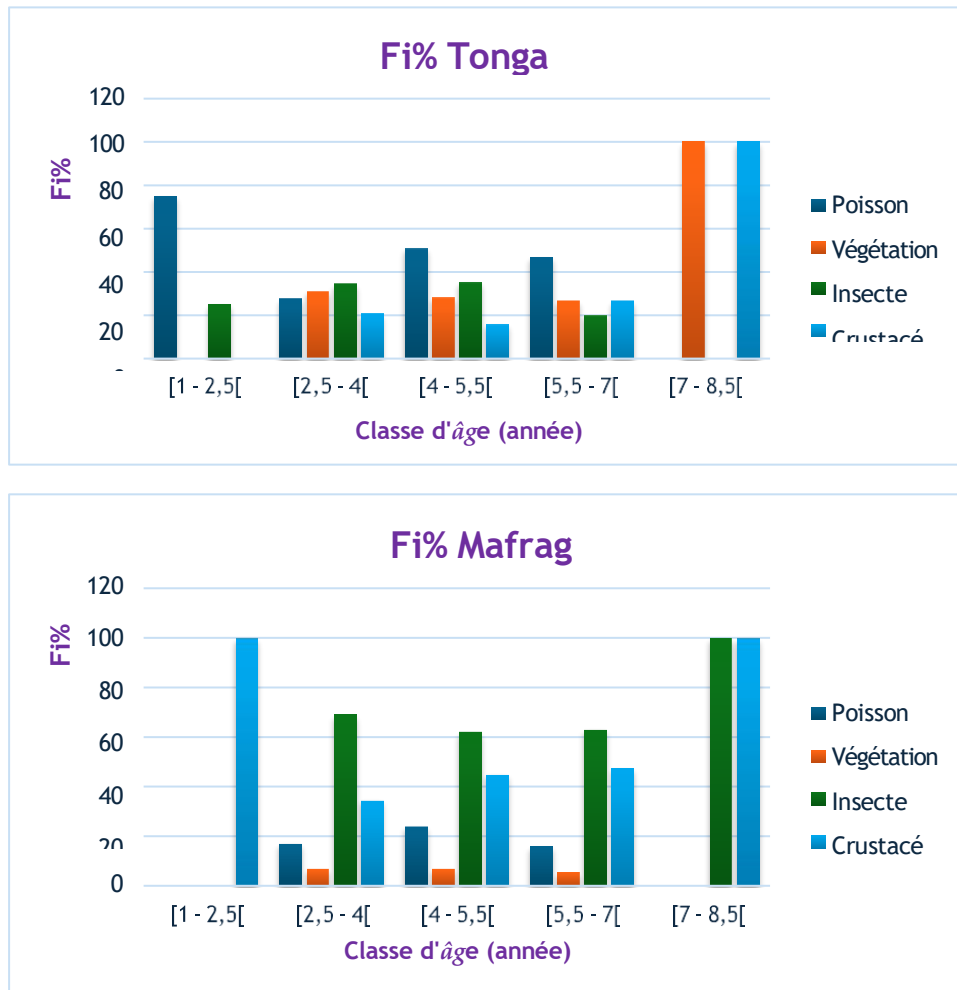


Figure 51 : proportions des proies ingérées par les anguilles des différentes classes de taille

Les anguilles de l'estuaire de la Mafragh, de la classe de taille [40 - 50[, montrent une consommation exclusive d'insectes de 100% de leur régime alimentaire. La classe de taille [50 - 60[ révèle une diversification des proies : poissons (8,33%) et insectes (62,50%). Les crustacés dominent à 66,67% (Figure 51). Pour la classe [60 - 70[, la proportion des insectes a augmenté pour atteindre 62,5%, et pour les poissons, la proportion est restée presque la même (30%). La proportion des crustacés a diminué pour atteindre 16,67%. La classe [70 - 80[ met en évidence une préférence accrue pour les insectes (66,67%) et une consommation équilibrée de poissons et de crustacés. Enfin, les anguilles de la classe [80 - 90[, présentent une consommation exclusive d'insectes (100%), ce qui illustre une spécialisation marquée dans leur régime alimentaire à ce stade de leur développement.



✓ Proportions des proies ingérées par les anguilles des différentes classes d'âge :



**Figure 52** : proportions des proies ingérées par les anguilles des différentes classes d'âge dans les deux plans d'eaux.

Lorsque l'on compare les proportions des proies ingérées par les anguilles du lac Tonga et ceux de l'estuaire du Mafrag, des différences notables émergent, reflétant probablement les variations dans les habitats et les disponibilités alimentaires entre ces deux plans d'eaux. Dans le lac Tonga, les anguilles de la classe d'âge [1 - 2,5[présentent une préférence marquée pour les poissons, représentant 75% de leur régime alimentaire, alors que celles de l'estuaire du Mafrag montrent une consommation exclusive dans la même tranche d'âge de crustacés à 100%. Les autres tranches d'âge anguilles montrent une diversification des proies, avec des schémas variables de préférence pour les poissons, la végétation, des insectes et des crustacés. L'analyse du régime alimentaire des anguilles (Fig. 52), montre des différences notables entre les deux



sites étudiés. Au lac Tonga, les anguilles jeunes consomment majoritairement des poissons, tandis qu'à la Mafragh, leur alimentation repose surtout sur les insectes et les crustacés. En grandissant, ces préférences évoluent : à Tonga, les anguilles se nourrissent exclusivement d'insectes, alors qu'à la Mafragh, elles privilégient à parts égales insectes et crustacés.



**Axe 3 : Biodiversité de la faune parasitaire de l'anguille européenne**

**1. Présentation des parasites recensés**

**1.1 Ectoparasites :**

- ✓ **Monogène : *Pseudodactylogyrus* sp.**

Les monogènes représentent un groupe de vers plats essentiellement ectoparasites, inféodés majoritairement aux poissons. Ils colonisent principalement les branchies, les nageoires ou la cavité buccale, bien que certaines espèces aient été signalées dans des sites atypiques comme la vessie urinaire d'amphibiens (famille des Polystomatidae) ou même l'œil de l'hippopotame (*Oculotrema hippopotami*). Ces parasites mesurent généralement entre 0,5 mm et 6 mm, bien que certaines espèces puissent atteindre jusqu'à 30 mm. On estime leur diversité à près de 25000 espèces, soit un effectif similaire à celui des téléostéens qu'ils parasitent. Leur cycle biologique est direct et ne nécessite qu'un seul hôte : l'adulte pond des œufs qui éclosent en larves ciliées actives capables de rechercher un nouvel hôte (Buchmann & Lindenstrøm, 2002). Certaines espèces, comme celles du genre *Gyrodactylus*, s'écartent cependant de ce modèle (Bakke et al., 2007). Sur le plan taxonomique, les monogènes se divisent en deux grands groupes : les *Monopisthocotylea*, dotés d'un unique organe de fixation postérieur (opisthapter), et les *Polyopisthocotylea*, pourvus de plusieurs. Cette classification proposée par Guy Oliver reste débattue, les données moléculaires et morphologiques étant parfois contradictoires, remettant même en question la monophylie du groupe (Justine, 1998).

**Classification systématique :**

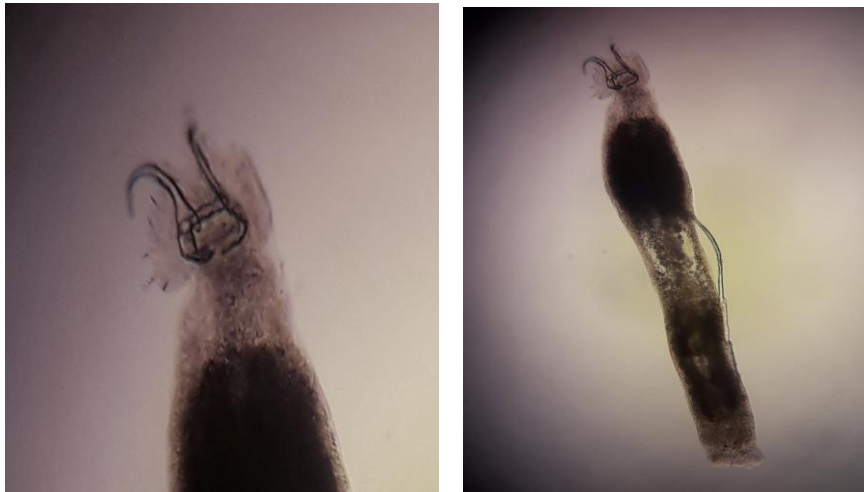
- Embranchement : Plathelminthes
- Classe : Monogenea (Van Beneden, 1858)
- Ordre : Monopisthocotylea (Odhner, 1912)
- Famille : Dactylogyroidea (Bychowsky, 1957)
- Sous-famille : Pseudodactylogyridae (Ogawa, 1986)
- Genre : *Pseudodactylogyrus* (Gussev, 1965)
- Espèce : *Pseudodactylogyrus* sp

Parmi les espèces les plus fréquemment observées sur les branchies de l'anguille européenne figurent *Pseudodactylogyrus anguillae* et *P. bini*. Bien que moins étudiées que *Anguillicoloides crassus*, ces espèces peuvent engendrer des troubles respiratoires sévères, notamment lorsque les conditions environnementales se détériorent, comme lors de périodes de forte chaleur ou



d'eutrophisation. Des travaux ont mis en évidence que ces deux espèces invasives ont contribué au remplacement du parasite autochtone *Gyrodactylus anguillae* dans certaines régions d'Italie (fleuve Tibre) et du Royaume-Uni (Kennedy & Di Cave, 1998a ; Kennedy et al., 1998b).

Sur le plan morphologique, *Pseudodactylogyrus* se caractérise par la présence d'un unique réservoir prostatique et par l'absence de crochets typiques, comme l'ont noté Ogawa et Egusa (1976) et Ogawa (1986). La forme et les dimensions de l'hamulus sont des critères diagnostiques majeurs pour distinguer les deux espèces. Ainsi, *P. bini* est généralement plus grand que *P. anguillae* (Chung et al., 1984). Les dimensions maximales de *P. anguillae* sont de 1659  $\mu\text{m}$  de long et 364  $\mu\text{m}$  de large, tandis que celles de *P. bini* atteignent 1960  $\mu\text{m}$  pour 336  $\mu\text{m}$  de large. (Figure 53).



**Figure 53** : Photographie de *Pseudodactylogyrus* sp. (Gr x40). (Présent travail)

L'infestation par ces parasites entraîne diverses réactions pathologiques : hypersécrétion de mucus, hyperplasie épithéliale, nécroses tissulaires au niveau des nageoires et des branchies. Les lésions ainsi générées peuvent favoriser des surinfections bactériennes ou fongiques, en particulier au début de la saison chaude, lorsque la température de l'eau s'élève.

✓ **Crustacé : *Ergasilus gibbus* (Von Nordmann, 1832)**

Les copépodes sont des crustacés à exosquelette rigide recouvert de chitine, dont le développement passe par plusieurs mues successives. Leur cycle de vie comprend généralement 12 stades : 6 naupliens suivis de 6 stades copépodites. Un trait remarquable chez de nombreuses espèces est la possibilité d'interrompre leur développement à certains stades – un phénomène



appelé « dormance », bien documenté également chez d'autres invertébrés aquatiques comme les rotifères et cladocères (Marcus, 1990 ; Andrewartha, 1952).

Chez les copépodes parasites, le cycle peut être perturbé dès le stade de l'œuf (œufs de résistance). Ces crustacés affectent une grande variété de poissons, provoquant des pathologies circulatoires comme l'anémie, ainsi que des atteintes au niveau de la peau et des branchies. En outre, ils sont impliqués dans la transmission de pathogènes, comme le virus de la virémie printanière de la carpe (VPC) (Girard & Elie, 2007).

**Classification systématique :**

- Embranchement : Arthropoda
- Classe : Maxillopoda
- Famille : Ergasilidae (Nordmann, 1832)
- Genre : *Ergasilus* (Nordmann, 1832)
- Espèce : *Ergasilus gibbus*



**Figure 54 :** Photographie d'*Ergasilus gibbus* (Présent travail)

*Ergasilus gibbus* est un copépode cyclopoïde d'environ 1,5 mm, appartenant à une petite famille de crustacés parasites spécialisés dans l'infestation des poissons d'eau douce. Il est fréquemment retrouvé sur les branchies, mais peut également coloniser la peau et les nageoires. Les femelles, et uniquement elles, sont parasitaires ; les mâles, en revanche, sont planctoniques. Ce parasite est particulièrement répandu dans les milieux à faible salinité et à température élevée (Ternengo et al., 2005).



Les antennes antérieures modifiées en crochets acérés permettent à *E. gibbus* de s'ancrer solidement aux tissus branchiaux de son hôte. En tant que parasite strict des branchies de l'anguille européenne, sa présence est un indicateur environnemental précieux des conditions physico-chimiques du milieu aquatique.

## 1.2 Endoparasites :

### ✓ Nématodes :

#### ✓ *Anguillicola crassus* (Kuwahara, Niimi & Itagaki 1974) :

*Anguillicoloides crassus* est un nématode appartenant à la famille des Anguillicolidae, découvert en 1974 par Kuwahara, Niimi et Itagaki. Ce parasite, devenu invasif en Europe, cible spécifiquement la vessie natatoire de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*). Il s'agit d'une espèce hétéroxène, dont le cycle de vie implique un copépode cyclopoïde comme hôte intermédiaire (De Charleroy et al., 1987). L'introduction de cette espèce en Europe serait liée à l'importation d'anguilles japonaises infectées dans des fermes aquacoles d'Europe de l'Est dans les années 1980 (Feunteun, 2002 ; Palstra et al., 2007 ; Jakob et al., 2009b ; Lefebvre et al., 2012). Depuis son apparition en Allemagne en 1982, la prolifération du parasite a été particulièrement rapide (Amilhat, 2007 ; Lefebvre et al., 2003), avec une différenciation génétique notable entre les populations méditerranéennes et atlantiques (Rahhou et al., 2005), suggérant plusieurs sources d'introduction. (Figure 55).



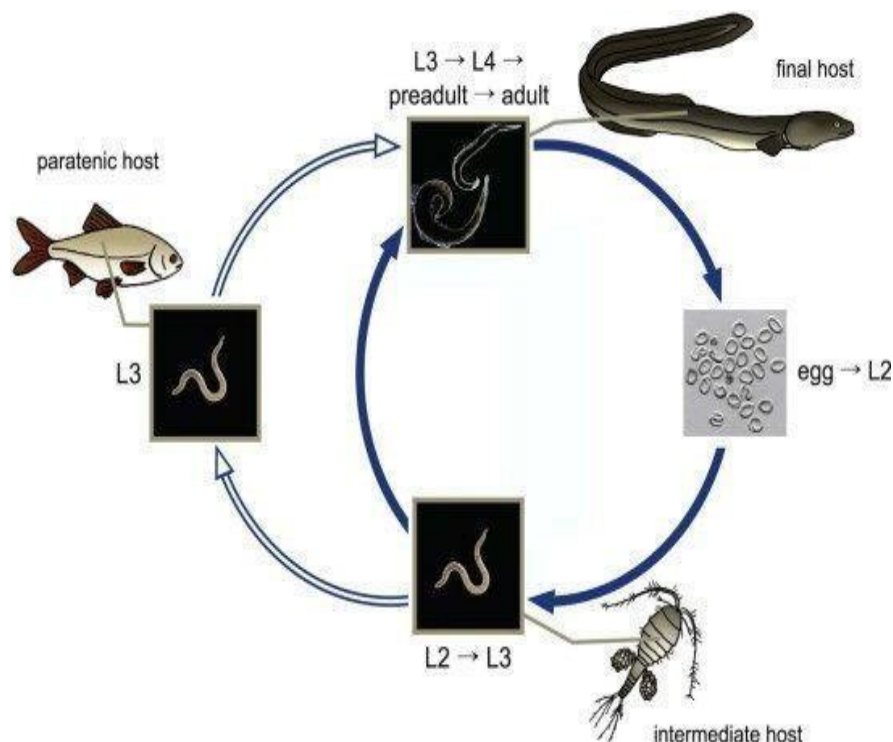
**Figure 55 :** *Anguillicoloides crassus* (femelle à droite, mâle à gauche) (Présent travail)



### Classification systématique

- Embranchement : Nematoda
- Classe : Spirurida
- Famille : Anguillicolidae
- Genre : *Anguillicola*
- Espèce : *crassus*

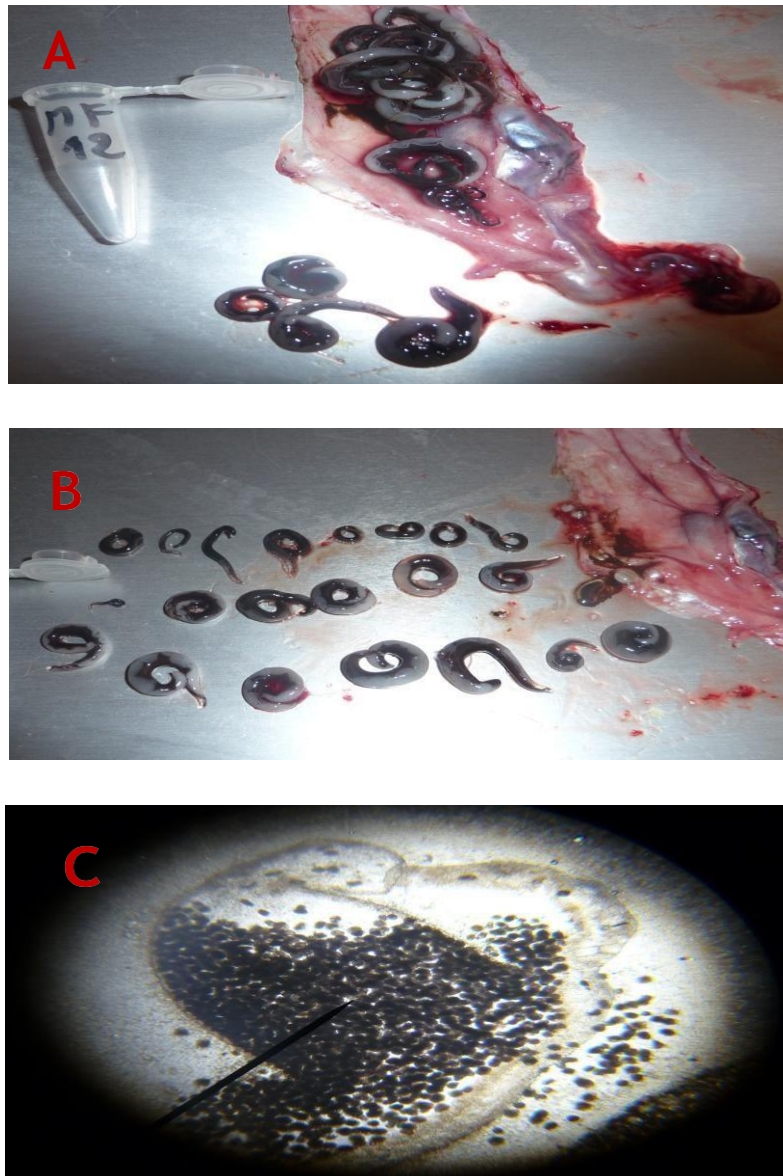
Ce nématode a développé une capacité d'adaptation remarquable aux milieux aquatiques européens. Il utilise une large gamme d'hôtes intermédiaires et paraténiques présents dans le régime alimentaire de l'anguille, incluant des poissons (locaux ou invasifs), mollusques, amphibiens (têtards, tritons), ainsi que des insectes aquatiques (Blanc, 1998 ; Cesco et al., 2001 ; Moravec & Skorikova, 1998 ; Amilhat, 2007) (Figure 56)



**Figure 56 :** Cycle de vie d'*Anguillicola crassus*. Le cycle de vie de base (flèche bleue) comprend les anguilles comme hôtes finaux et les copépodes comme hôtes intermédiaires. En intégrant des paraténiques supplémentaires hôtes (p. ex., poissons), le cycle de vie peut être prolongé (flèche blanche). (Moravec, 2006).



Ce nématode peut infecter des anguilles dès leur jeune âge (dès 6 cm), s'adaptant à la taille de la vessie natatoire de l'hôte (Banning & Haenen, 1990 ; Lefebvre et al., 2002a). (Figure 57). Son cycle reproductif est rapide : en 2 à 4 mois (Benajiba et al., 1994), parfois jusqu'à 6 mois selon les conditions environnementales (Lefebvre et al., 2002b ; Amilhat, 2007), ce qui permet des pics de prévalence saisonniers, en début d'été ou à la fin de l'hiver.



**Figure 57 :** Vessie gazeuse d'une anguille massivement infestée par *Anguillicola crassus* (A). Différents stades (larves et adultes) (B). Adulte sous microscope G40 (C). (Présent travail)



Une seule femelle peut produire jusqu'à 150 000 œufs (Vigier, 1997 ; Amilhat, 2007), ce qui accentue son potentiel invasif. Des expériences en laboratoire ont démontré que *A. crassus* peut survivre dans l'eau de mer (jusqu'à 100 % de salinité) pendant six mois, ce qui lui conférerait une capacité de survie suffisante pour accompagner l'anguille tout au long de sa migration transatlantique (Kennedy & Fitch, 1990 ; Kirk et al., 2002). Cette survie prolongée est notamment facilitée par son osmoconformation au plasma de l'hôte (Kirk et al., 2002).

Enfin, les conditions naturelles, telles que les variations saisonnières de température et de salinité dans les zones comme l'étang de Manguio, ne semblent pas affecter significativement le déroulement de son cycle biologique (Benajiba et al., 1994), renforçant encore son aptitude à coloniser divers environnements.

✓ *Eustrongylides sp* :

Le genre *Eustrongylides* appartient à la famille des Dioctophymatidae (ordre des Enoplida). Ces nématodes parasites d'eau douce sont largement distribués à travers les lacs et rivières d'Europe, d'Amérique du Nord, d'Asie et d'Afrique, où ils représentent une menace croissante pour les poissons sauvages, les oiseaux piscivores et la santé publique. L'espèce *Eustrongylides excisus* est aujourd'hui considérée comme l'espèce dominante en Europe, notamment dans les grands lacs italiens tels que Trasimène ou Massaciucoli (Franceschini et al., 2022 ; Castiglione et al., 2023). (Figure 58).

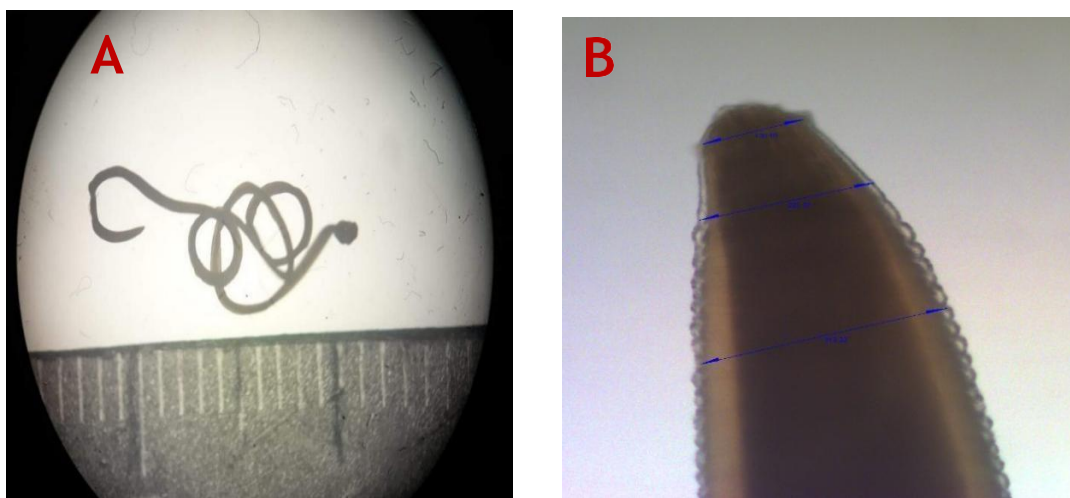


**Figure 58** : Anguille argentée massivement infestée par *Eustrongylides sp*. (Présent travail)

Les larves de *Eustrongylides sp* sont facilement visibles à l'œil nu, atteignant jusqu'à 59 mm de long. Elles se distinguent par une forme filiforme et une coloration rouge foncé, due à la forte



teneur en hémoglobine, un trait rare chez les nématodes. Ce pigment leur confère une grande affinité pour l'oxygène, leur permettant de survivre dans des environnements pauvres en oxygène, tels que les tissus internes des poissons hôtes (Measures, 1988 ; Dezfuli et al., 2015). Leur présence, même à l'état mort, rend le poisson impropre à la consommation, selon la législation sanitaire européenne sur les parasites visibles (Règlement CE 2074/2005 ; Codex Alimentarius, 1971). (Figure 59). Sur le plan zoonotique, plusieurs cas d'infection humaine ont été recensés, associés à l'ingestion de poissons d'eau douce crus ou insuffisamment cuits. Les manifestations peuvent être sévères, allant de douleurs abdominales à des perforations intestinales, bien que les cas soient rares (Eberhard et al., 1989 ; Franceschini et al., 2022).



**Figure 59** : L'espèce de nématode *Eustrongylides sp* récoltée d'anguille de l'estuaire de Mafragh (A) ; Extrémité antérieure de *Eustrongylides sp*; Agrandissement de 100x. (Présent travail)

#### Classification systématique

- Embranchement : *Nematoda*
- Classe : *Adenophorea*
- Ordre : *Enoplida*
- Famille : *Dioctophymatidae*
- Genre : *Eustrongylides*
- Espèce : *Eustrongylides sp*

*Eustrongylides sp* est un nématode à cycle de vie indirect impliquant trois hôtes principaux. Selon Franceschini et al. (2022) et Castiglione et al. (2023), les oiseaux piscivores sont les hôtes



définitifs, où le parasite atteint sa maturité et pond des œufs, ensuite éliminés dans l'environnement aquatique. Ces œufs sont ingérés par des vers oligochètes benthiques, hôtes intermédiaires primaires, dans lesquels les larves évoluent jusqu'au stade infectieux. Les poissons d'eau douce constituent les hôtes intermédiaires secondaires : ils contractent l'infection en consommant ces vers et hébergent les larves dans leurs tissus internes. Le cycle se complète lorsque l'un de ces poissons est ingéré par un oiseau, permettant au parasite d'atteindre à nouveau l'hôte définitif. Des hôtes paraténiques comme certains amphibiens ou reptiles peuvent aussi intervenir sans transformation larvaire, mais facilitant la transmission vers l'oiseau. (Figure 60).

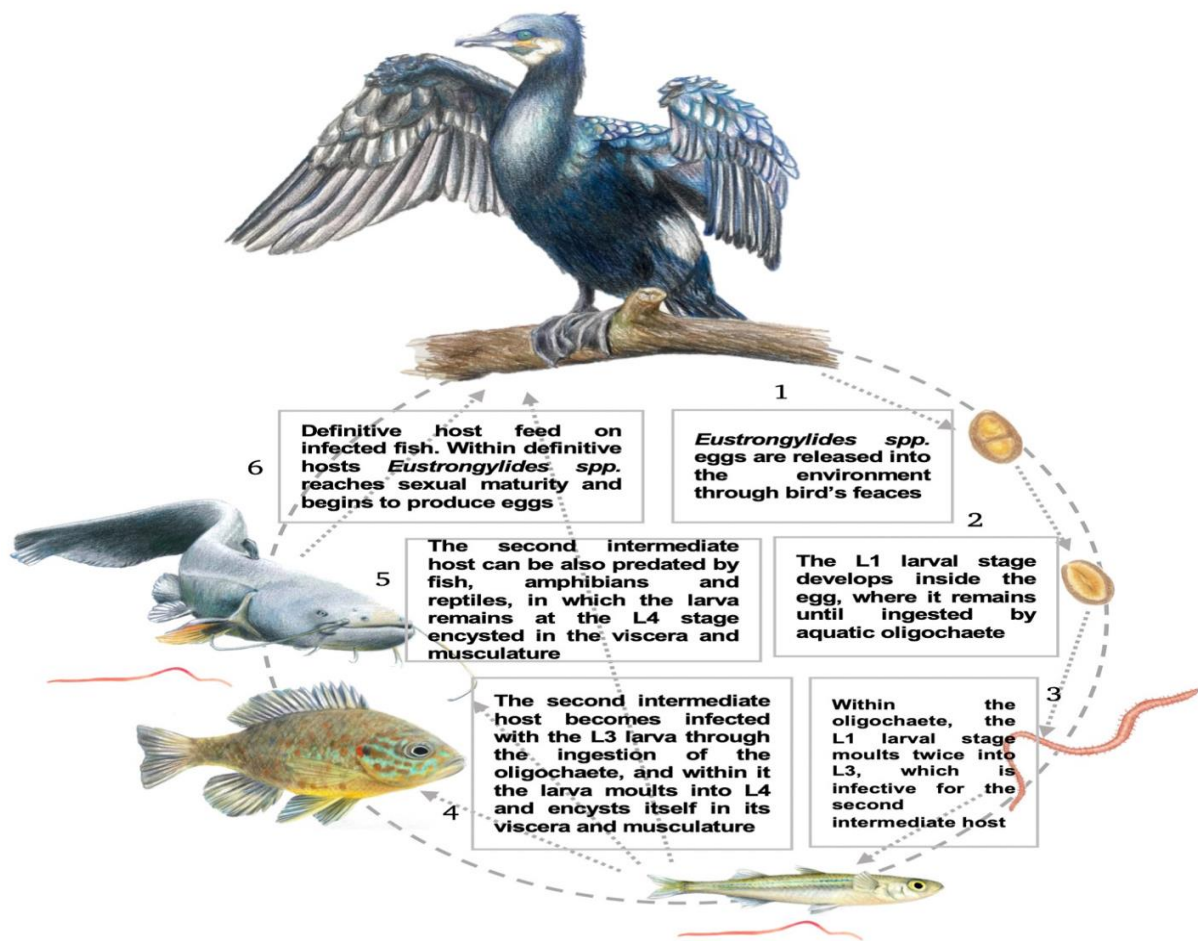


Figure 60 : Cycle biologique d'*Eustrongylides* sp. (Castiglione, D. et al. 2023).

Le développement de *Eustrongylides* sp est étroitement corrélé aux dynamiques trophiques et à la présence des oligochètes dans les sédiments riches en matière organique. Des conditions comme l'eutrophisation, la température élevée et la présence massive de cormorans favorisent sa prolifération (Rusconi et al., 2022). Face à l'augmentation des infestations, des actions correctives ont été mises en œuvre dans les chaînes de production, notamment au lac Trasimène. Pendant cinq ans, des stratégies de gestion ont inclus l'inspection systématique des poissons,



l'éviscération rapide, le glaçage, le parage des filets et la formation des opérateurs (Franceschini et al., 2022). Ces mesures ont permis de maîtriser le risque tout en maintenant la qualité des produits halieutiques, devenant ainsi un modèle de gestion parasitaire intégré.

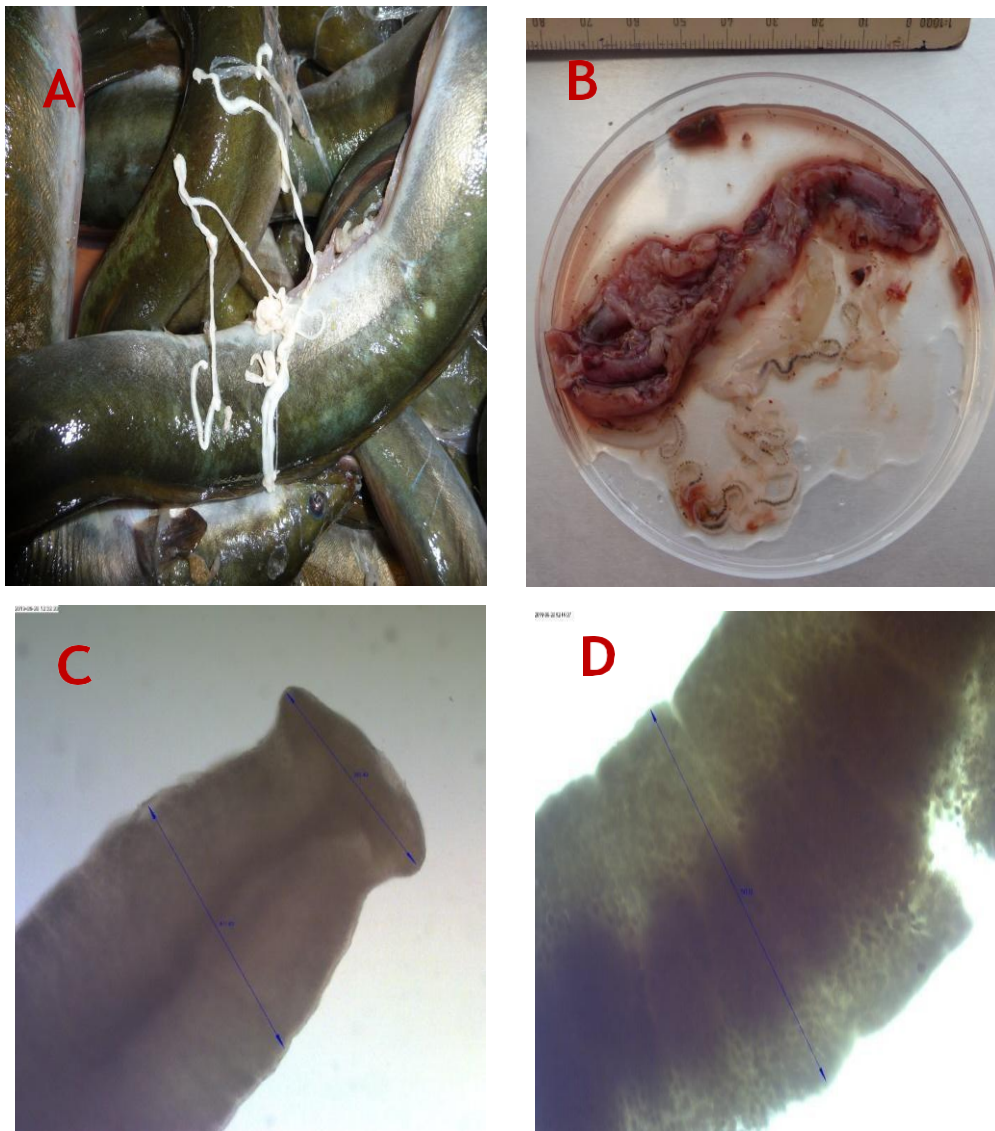
✓ **Cestodes :**

✓ *Bothriocephalus claviceps*

*Bothriocephalus claviceps* est un cestode d'envergure cosmopolite, largement répandu chez de nombreuses espèces de poissons d'eau douce et saumâtre. L'infestation de ses hôtes se produit le plus souvent dans les environnements estuariens, zones de transition propices à la rencontre entre hôtes intermédiaires et hôtes définitifs. Ce parasite, particulièrement volumineux (Figure 61), colonise la portion antérieure de l'intestin de son hôte, en l'occurrence l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), chez qui il achève son cycle reproductif. Le scolex, ou tête du parasite, se fixe solidement à proximité du sphincter pylorique. Des spécimens adultes peuvent atteindre jusqu'à 90 cm de longueur, ce qui en fait l'un des cestodes les plus massifs observés dans les espèces piscicoles étudiées. Le cycle de vie de *B. claviceps* est indirect, impliquant deux hôtes successifs : un hôte définitif – *A. anguilla* – où se déroule la reproduction sexuée, et un hôte intermédiaire – généralement un copépode cyclopoïde – dans lequel se développe le stade larvaire. Bien que ce parasite puisse entraîner des effets mécaniques notables, tels que des obstructions intestinales ou une entrave à la croissance, aucun effet pathogène direct n'a été formellement rapporté à ce jour (Élie & Girard, 2009).

**Position systématique :**

- **Embranchement :** Platyhelminthes
- **Classe :** Cestoda
- **Famille :** Bothriocephalidae (Blanchard, 1849)
- **Genre :** *Bothriocephalus* (Rudolphi, 1808)
- **Espèce :** *claviceps* (Goeze, 1782)



**Figure 61 :** L'espèce *Bothriocephalus claviceps* bien apparente de la récolte des échantillons d'anguilles (A) ; Tube digestive massivement infesté par *Bothriocephalus claviceps* (B) ; Scolex montrant les deux ventouses(C) ; proglottis gravides (D), Agrandissement de 40x. (Présent travail)

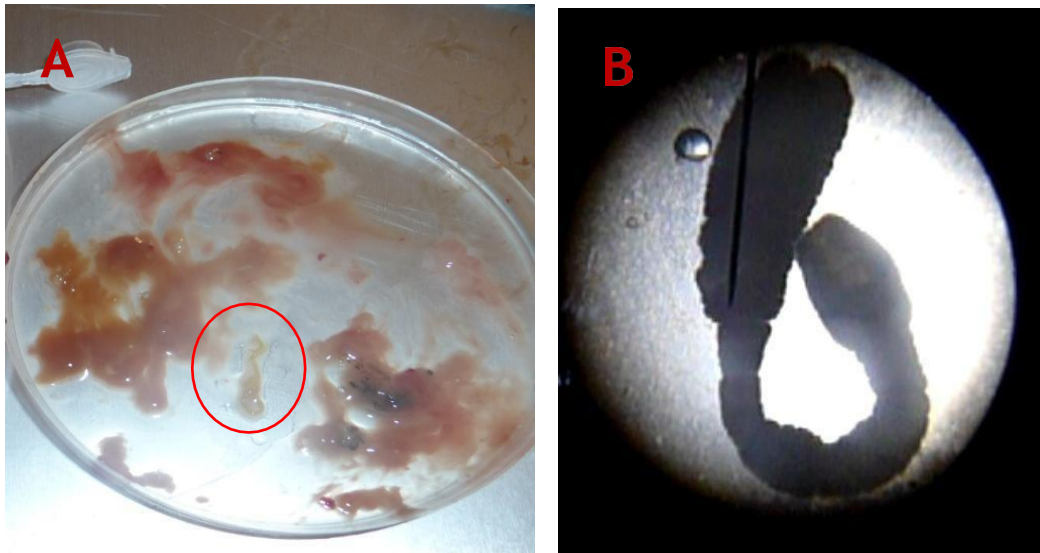
De nombreuses études ont décrit l'anatomie de *B. claviceps* en détail (Cooper, 1918 in Wardle & MacLeod, 1952 ; Murai, 1979 ; Altunel, 1974). Le parasite peut atteindre une largeur allant jusqu'à 540 mm (Cooper, 1919). Ses proglottis, segments reproducteurs, sont typiquement plus larges que longs. Le scolex présente une forme allongée, se terminant par une extrémité effilée, et le cou est absent, ce qui facilite l'ancrage dans la muqueuse intestinale.



Les organes reproducteurs sont bien développés : les testicules, en forme sphérique ou ovoïde, sont médullaires et répartis en deux bandes latérales (entre 50 et 80 par segment). La poche du cirre, médioventrale, s'ouvre dorsalement dans l'atrium génital. Les glandes vitellines forment un manchon continu dans le cortex, et l'ovaire, bilobé, est relié par un pont ovarien. L'utérus sinueux, de forme tubulaire, débouche sur un tocostome musculaire s'ouvrant de manière irrégulière sur la face ventrale.

✓ **Larve de *Bothriocephalus sp*:**

En complément des adultes, cette étude a permis d'identifier la présence de larves de *Bothriocephalus sp* au niveau des intestins des anguilles examinées. Leur présence confirme une transmission active dans les deux écosystèmes étudiés, probablement via l'ingestion de copépodes infestés par les stades larvaires.



**Figure 62 :** A : Larve de cestode *Bothriocephalus sp* trouvé au niveau des intestins des anguilles examinées ; B : photo de cette larve sous microscope G40. (Présent travail)



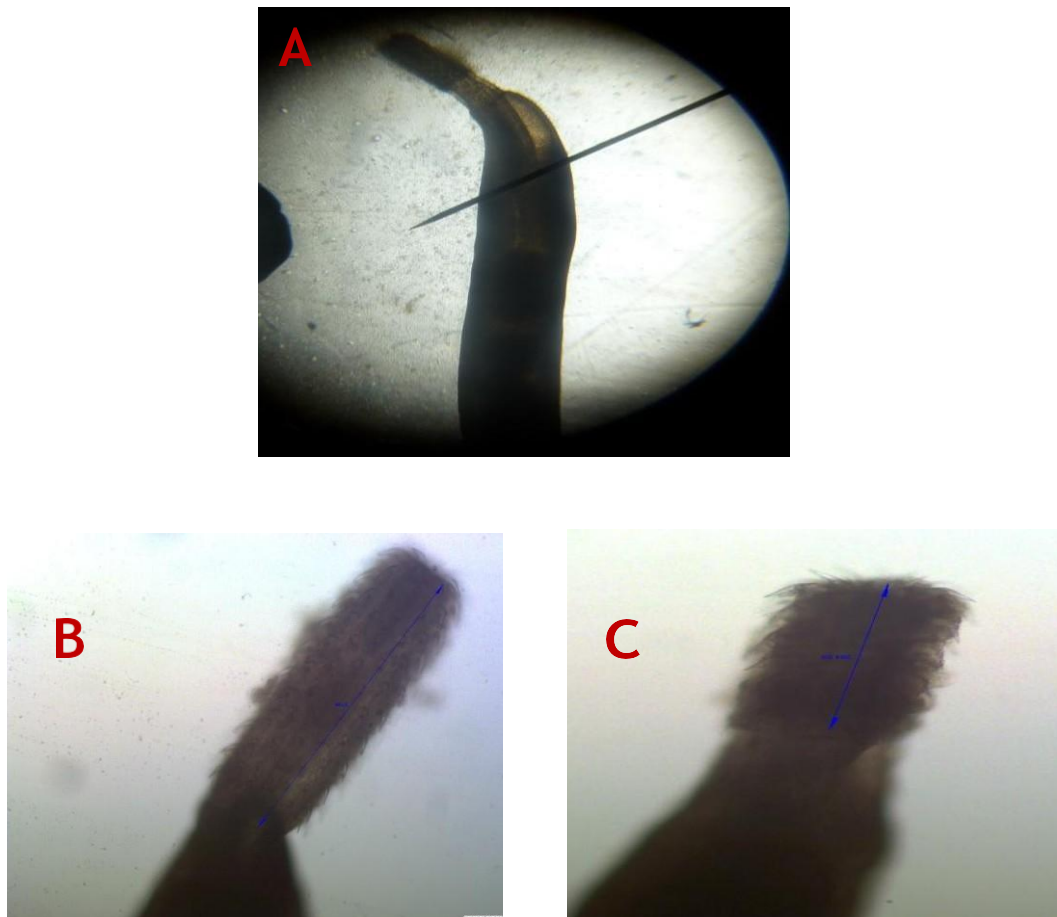
✓ **Acanthocéphale :**

✓ *Echinorhynchus sp.*

Les acanthocéphales, parasites intestinaux souvent rencontrés chez les poissons, se distinguent par leur morphologie caractéristique : un corps allongé en forme de sac et un proboscis rétractile armé d'épines chitineuses. La forme, le nombre et la disposition de ces crochets sur le proboscis sont des critères essentiels pour l'identification taxonomique des espèces. Pour une classification précise, il est impératif que le proboscis soit totalement éversé au moment de la fixation. Parmi les espèces les plus communes chez les poissons d'eau douce figure *Acanthocephalus anguillae*, régulièrement identifié chez l'anguille (*Anguilla anguilla*), la perche ou encore la carpe (Figure 63). Cette espèce se reconnaît par sa trompe en massue, longue d'environ 1 mm, portant 10 à 12 rangées longitudinales de 5 à 7 crochets chacune. La base des crochets présente deux appendices digitiformes obliques, typiques de l'espèce. Le cou est court et dépourvu de verrues, autre trait distinctif. La taille varie selon le sexe : les mâles mesurent entre 5 et 7 mm, tandis que les femelles sont plus grandes, atteignant 12 à 20 mm. Le crustacé *Asellus aquaticus* agit comme hôte intermédiaire, en particulier entre les mois d'avril et juin, période au cours de laquelle le parasite est le plus fréquemment observé dans les populations hôtes (Near et al., 1998).

**Position systématique :**

- **Embranchement** : Acanthocephala
- **Classe** : Palaeacanthocephala
- **Ordre** : Echinorhynchida
- **Famille** : Echinorhynchidae (Cobbold, 1879)
- **Genre** : *Echinorhynchus* (Zoega, 1776)
- **Espèce** : *Echinorhynchus sp.*



**Figure 63** : *Acanthocephalus d'Anguilla anguilla* (A) ; Proboscis d'un *Echinorhynchus sp* : femelle (B) ; male (C) **(Présent travail)**

Trois espèces notables appartenant à ce genre ont été décrites : *Echinorhynchus gadi*, parasite marin principalement retrouvé chez les salmonidés anadromes, dont la présence indique souvent une consommation préalable d'invertébrés marins. *E. leidyi* et *E. salmonis*, espèces plus fréquentes en eau douce, mesurant entre 10 et 30 mm, et colonisant la paroi intestinale de leurs hôtes.

Le mode d'alimentation de ces parasites repose sur une absorption osmotique via la surface du tégument. Ils pondent un grand nombre d'œufs, favorisant ainsi la dissémination de leurs larves dans le milieu aquatique. Les hôtes intermédiaires typiques incluent des petits crustacés comme les gammarés, mais aussi des insectes aquatiques, des poissons, des sangsues ou des mollusques comme les limnées. Lorsque ces hôtes infectés sont consommés par un poisson, le parasite se développe à l'intérieur du tube digestif. En cas de forte infestation, une altération significative de la santé du poisson peut être observée, incluant des troubles digestifs, une réduction de croissance, voire un risque accru de mortalité.



## 2. Diversités parasitaires :

L'examen des anguilles capturées dans les 2 plans d'eau nous a permis de récolter **8698** parasites de **8** espèces ; deux ectoparasites : *Pseudodactylogyrus sp* et *Ergasilus sp* ; Six endoparasites dont trois nématodes : *Eustrongylides sp*; *Larves de nématode* et *Anguillicola crassus* ; Deux cestodes : *Bothriocephalus claviceps* et *larve de Bothriocephalus sp* ; Et un acanthocéphale : *Echinorhynchus sp*. Le **Tableau 15** détaille les différents paramètres épidémiologiques relatifs à chaque site étudié, malgré le nombre important d'individu examiné pour Lac Tonga, le site présente 6 espèces parasitaires, contre 8 à l'estuaire de Mafragh ; et l'abondance moyenne (A) et l'intensité moyenne (I) sont bien plus élevées à l'estuaire de Mafragh.

**Tableau 15** : Paramètres épidémiologiques : Prévalence (P%), abondance (A) et Intensité moyenne (I) des parasites recensés chez les anguilles du lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.

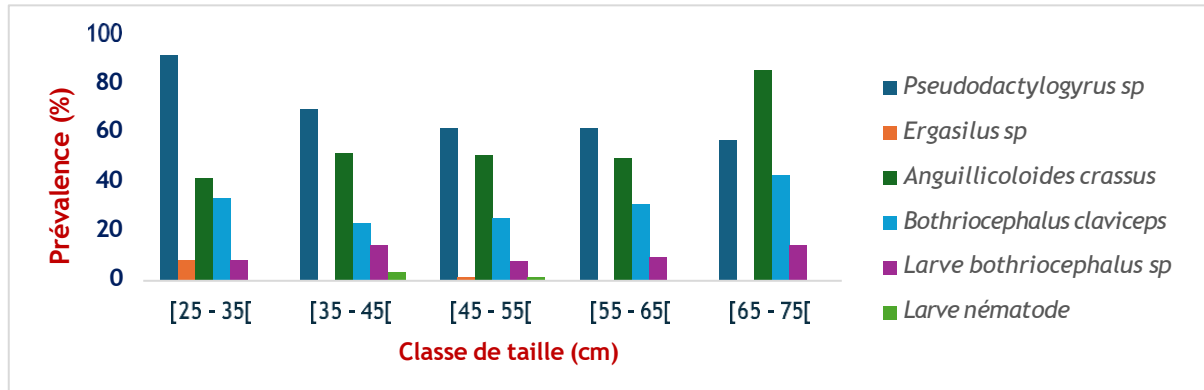
Site		Tonga					Mafragh				
Salinité		Eau douce					Eau saumâtre				
Nombre d'anguilles examinées		180					97				
Parasite	Organe infesté	N parasites	N ang infestée	P (%)	A	I	N parasites	N ang infestée	P (%)	A	I
<i>Pseudodactylogyrus sp</i>	Branchies	2186	119	66,11	12,14	18,37	4454	67	69,07	45,92	66,48
<i>Ergasilus sp.</i>	Branchies	2	2	1,11	0,01	1	602	44	45,36	6,21	13,68
<i>Anguillicoloides crassus</i>	Vessie nataoire	343	33	18,33	1,91	10,39	440	63	64,95	4,54	6,98
<i>Eustrongylides sp</i>	Cavité abdominale	/	/	/	/	/	119	6	6,19	1,23	19,83
<i>Larve de nématode</i>	Intestins	4	3	1,67	2,22	1,33	45	14	14,43	0,46	3,21
<i>Bothriocephalus claviceps</i>	Intestins	139	49	27,22	77,22	2,84	195	30	30,93	2,01	6,5
<i>Larve de Bothriocephalus sp</i>	Intestins	40	19	10,56	22,22	2,11	115	37	38,14	1,19	3,11
<i>Echinorhynchus sp</i>	Intestins	/	/	/	/	/	14	8	8,25	0,14	1,75
Globale parasites		2714	164	91,11	15,08	16,55	5984	95	97,94	61,69	62,99



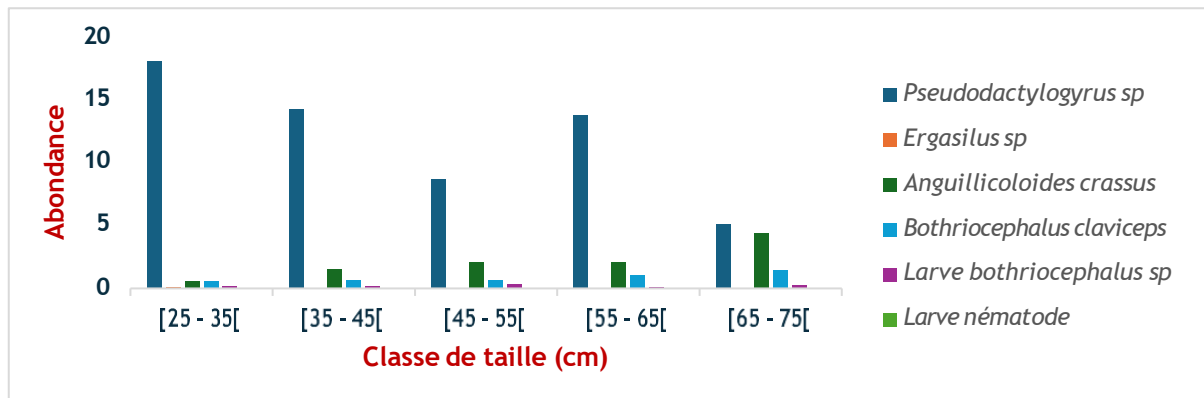
## 2.1 Variation des indices épidémiologiques chez les anguilles du lac Tonga :

✓ Variation en fonction des classes de taille :

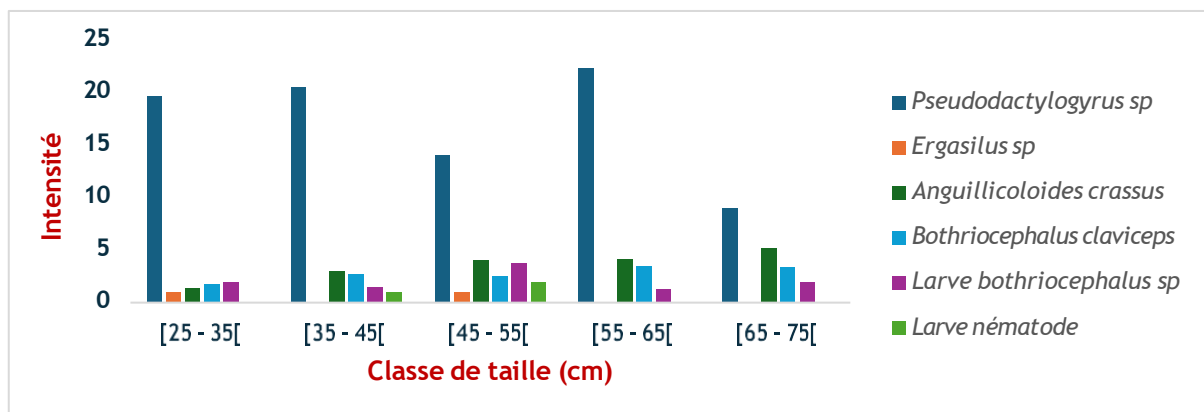
A



B



C



**Figure 64 :** Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalence (P%) ; B : Abondance (A) et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles du lac Tonga en fonction de leurs classes de taille



La **Figure 64** illustre la prévalence (A), l'abondance (B) et l'intensité (C) des différents parasites infectant les anguilles du lac Tonga, en fonction des classes de taille des individus examinés.

En ce qui concerne la prévalence ; *Pseudodactylogyrus sp* est le parasite dominant avec un taux de prévalence très élevé, surtout chez les plus petites classes de taille [25-35 [cm où il atteint presque 90%. Sa prévalence diminue légèrement avec l'augmentation de la taille des poissons. *Anguillicoloides crassus* montre une augmentation progressive de sa prévalence, atteignant son pic dans la classe [65-75 [cm (environ 85%). Ceci suggère que ce parasite s'accumule avec le temps, affectant davantage les individus plus âgés. *Bothriocephalus claviceps* présente une prévalence stable entre 20 et 40% selon la taille des individus. *Ergasilus sp.*, *Larves de Bothriocephalus sp* et *Larves de nématodes* ont des prévalences relativement faibles (< 20%) (**Figure 64 ; A**).

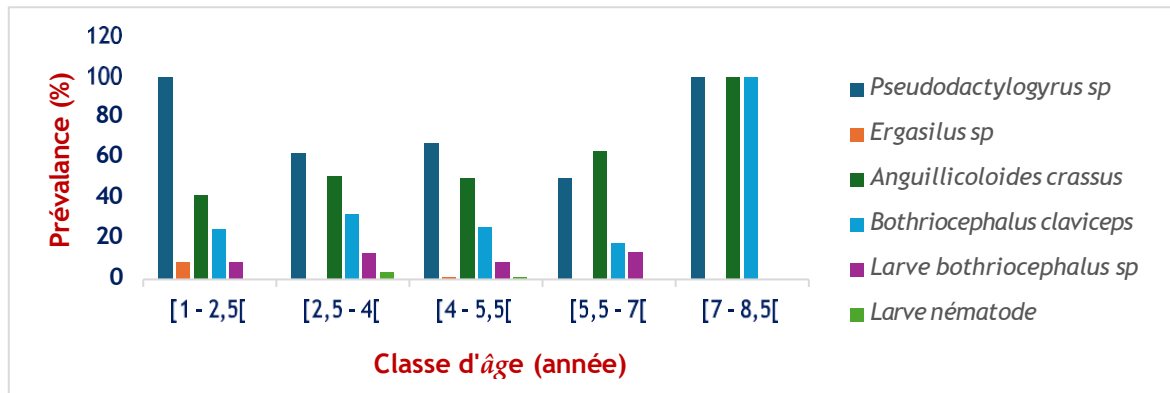
De même quand il s'agit de l'abondance. *Pseudodactylogyrus sp* est largement dominant, avec une abondance très élevée dans toutes les classes de taille, mais surtout chez les plus petits poissons. Alors que *Anguillicoloides crassus* et *Bothriocephalus claviceps* montrent des abondances plus faibles mais restent bien représentés, en particulier dans les grandes classes de taille (**Figure 64 ; B**)

Pour l'intensité, *Pseudodactylogyrus sp* reste le parasite le plus intense, avec un nombre élevé d'individus par individu infecté, surtout dans les classes de taille [25-35 [et [55-65 [cm. *Anguillicoloides crassus* et *Bothriocephalus claviceps* montrent également une intensité modérée, suggérant une infection plus prononcée chez certains individus. Le reste des parasites ont une intensité beaucoup plus faible (**Figure 64 ; C**)

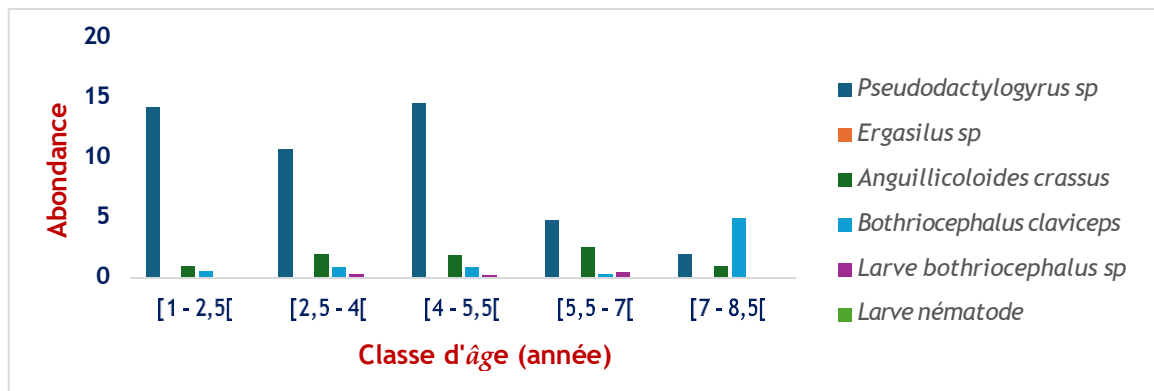


✓ Variation en fonction des classes d'âge :

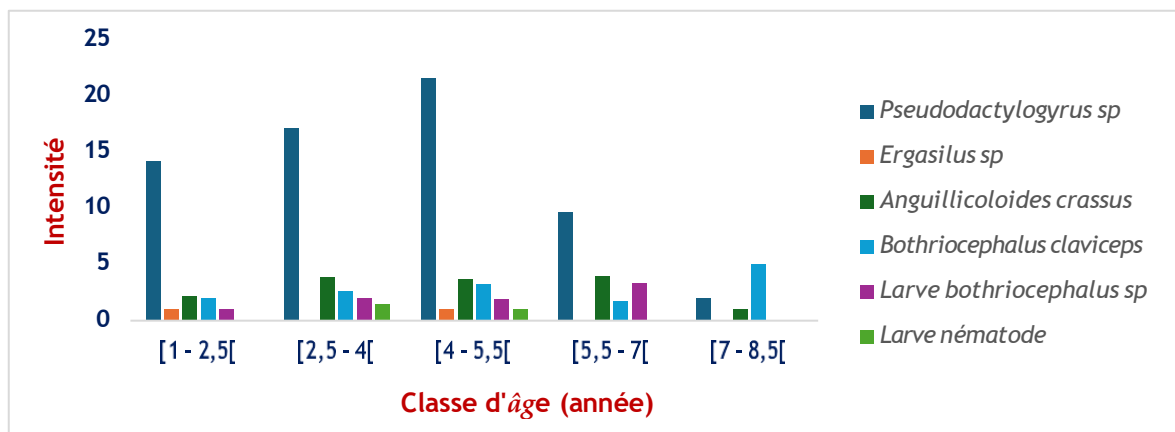
A



B



C



**Figure 65 :** Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalence (P%) ; B : Abondance (A) et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles du lac Tonga en fonction de leurs classes d'âge



La **Figure 65** présente variation des indices épidémiologiques des principaux parasites infectant les anguilles du lac Tonga en fonction de leurs classes d'âge.

La prévalence parasitaire révèle des variations importantes selon les classes d'âge chez les anguilles du lac Tonga. *Pseudodactylogyrus sp* domine avec 100% de prévalence chez les jeunes [1-2,5[ans, et les plus âgés [7-8,5[ans, mais descend à 50-67% pour les classes intermédiaires. À l'inverse, *Anguillicoloides crassus* voit sa prévalence augmenter régulièrement de 41,67% chez les jeunes à 100% chez les anguilles âgées. *Bothriocephalus claviceps* maintient une prévalence stable autour de 18-32%, sauf un pic à 100% dans la dernière classe d'âge. Les autres parasites montrent des prévalences faibles : *Ergasilus sp* ne dépasse pas 8,33%, les larves de *Bothriocephalus sp* atteignent au maximum 13,21% chez les [2,5-4[, tandis que les larves de nématodes restent sous 4%. (**Figure 65 ; A**).

Ainsi, les variations marquées de l'abondance parasitaire selon les classes d'âge chez les anguilles du lac Tonga. *Pseudodactylogyrus sp* présente les valeurs les plus élevées, culminant à 14,57 parasites/individu chez les [4-5,5[ans, avant de chuter à 2 chez les plus âgés [7-8,5[. *Anguillicoloides crassus* montre une abondance croissante avec l'âge, passant de 0,92 à 2,55 parasites/individu, avec un pic à 2,55 chez les [5,5-7[. *Bothriocephalus claviceps* maintient une abondance stable autour de 0,32-0,84, sauf un pic exceptionnel à 5,00 chez les [7-8,5[ans. Les autres parasites présentent des abondances faibles : *Ergasilus sp* ne dépasse pas 0,08, les larves de *Bothriocephalus sp* atteignent au maximum 0,45 chez les [5,5-7[ans, tandis que les larves de nématodes restent inférieures à 0,06. (**Figure 65 ; B**).

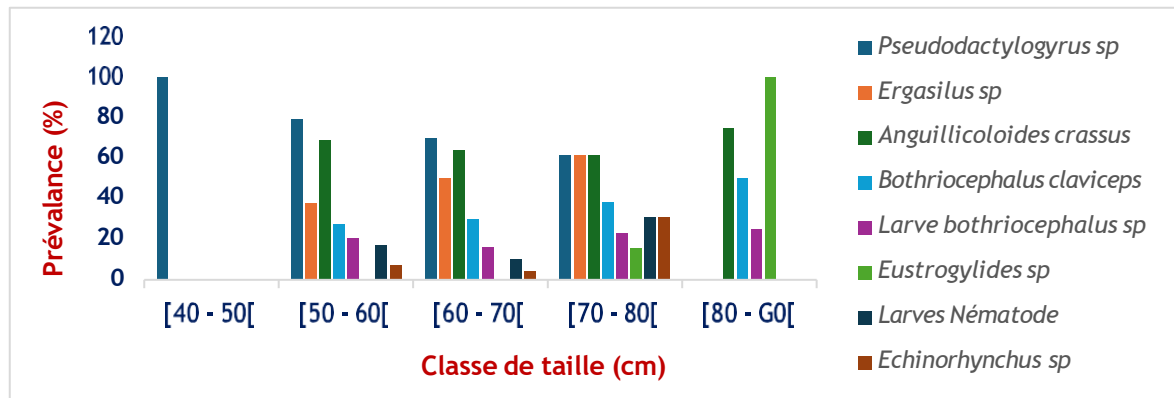
Pour l'intensité moyenne des infections révèle des tendances significatives selon les classes d'âge. *Pseudodactylogyrus sp* montre son intensité maximale (21,61 parasites/hôte infecté) chez les anguilles [4-5,5[ans, suivie d'une diminution progressive jusqu'à 2 chez les [7-8,5[ans. *Anguillicoloides crassus* présente une intensité croissante avec l'âge, passant de 2,20 à 4,00 parasites/hôte infecté, atteignant son maximum chez les [5,5-7[ans. *Bothriocephalus claviceps* maintient une intensité stable entre 1,75 et 3,21, avec un pic remarquable à 5,00 chez les plus âgés [7-8,5[ans. Les autres parasites affichent des intensités globalement faibles : *Ergasilus sp*. (0-1,00), larves de *Bothriocephalus sp*. (1,00-3,33) et larves de nématodes (0-1,50), avec des valeurs maximales généralement observées dans les classes intermédiaires [2,5-7[. (**Figure 65; C**).



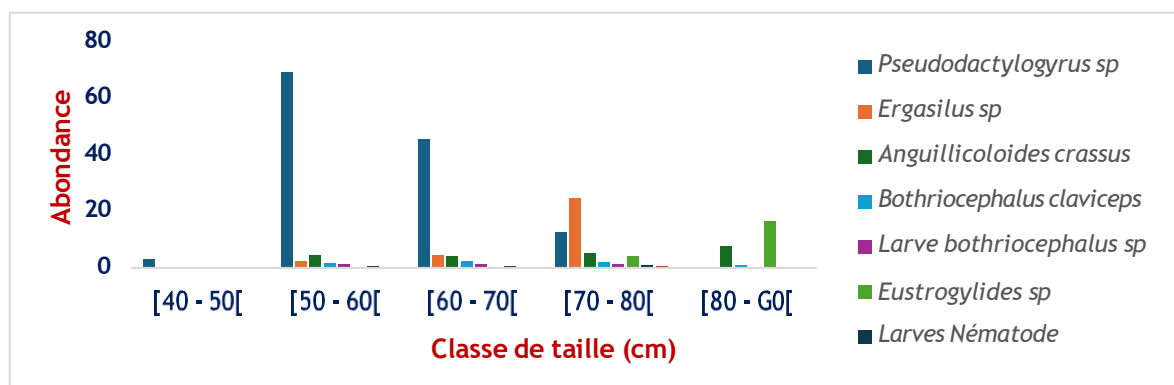
## 2.2 Variation des indices épidémiologiques chez les anguilles de l'estuaire du Mafragh:

✓ Variation en fonction des classes de taille :

A



B



C

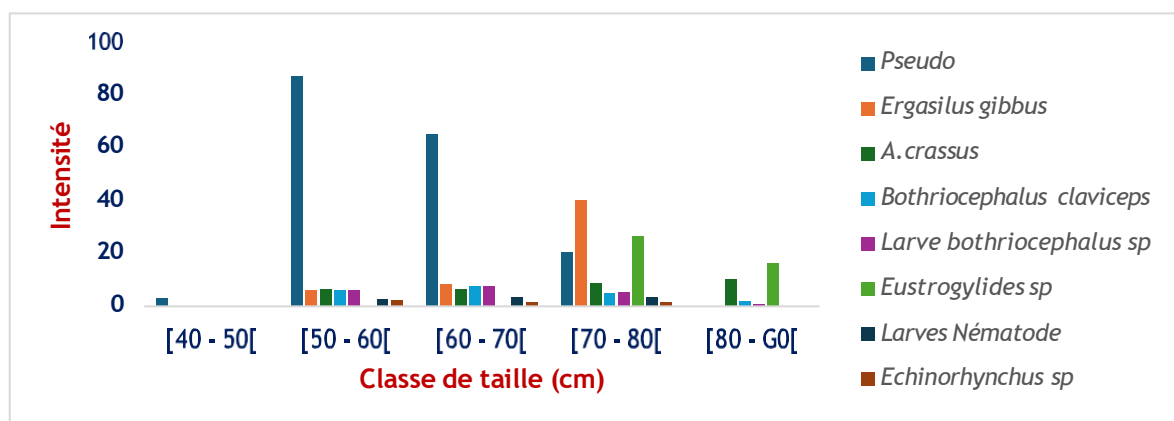


Figure 66 : Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalance (P%) ; B : Abondance (A) et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles de la Mafragh en fonction de leurs classes de taille



La **Figure 66** illustre la prévalence (A), l'abondance (B) et l'intensité (C) des différents parasites infectant les anguilles dans l'estuaire de Mafragh, en fonction des classes de taille des individus examinés.

En termes de prévalence l'espèce *Pseudodactylogyrus sp* est dominante dans presque toutes les classes de taille, surtout dans les petites [40-50]cm où ce parasite dépasse 90 %. *Anguillicoloides crassus* a une prévalence marquée dans les grandes tailles supérieures à 60cm. Suivie par *Bothriocephalus claviceps* et *Ergasilus sp* qui montrent une prévalence intermédiaire et stable, et puis viendront *Eustrongylides sp* et les larves de nématodes apparaissent surtout dans les grandes tailles [70-90]cm (**Figure 66 ; A**).

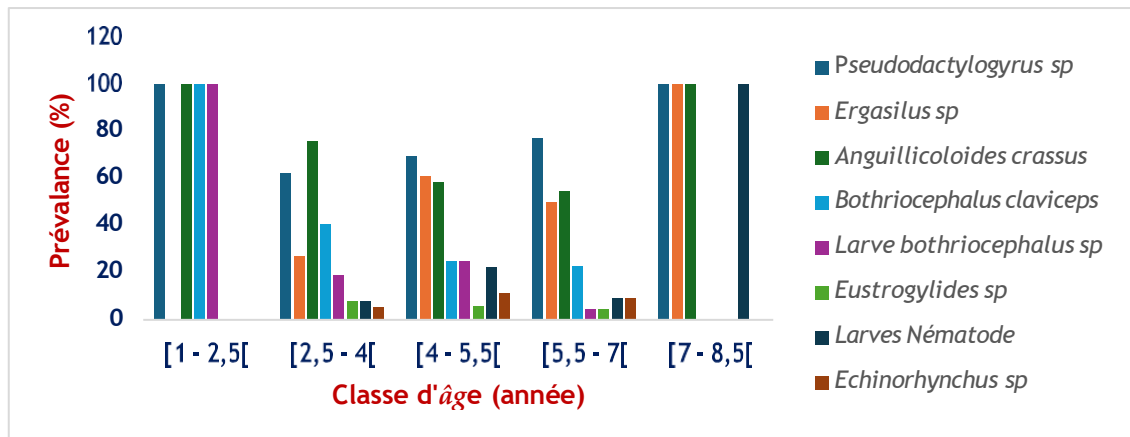
L'abondance, comme rapportée dans la **Figure 66 ; B**, indique que *Pseudodactylogyrus sp* est de loin le plus important avec des maximas observés chez les individus de taille entre 50-60 cm. *Ergasilus sp* atteint son pic dans la classe de taille moyenne intermédiaire entre 50-80 cm, alors que les parasites *Anguillicoloides crassus* et *Bothriocephalus claviceps* sont relativement abondants chez les individus plus grands. Quant à *Eustrongylides sp*, ils ne sont pas nombreux, mais sont prédominants zonalement chez les individus de taille supérieure à 70 cm.

L'évaluation de l'intensité parasitaire (**Figure 66 ; C**), révèle des variations très importantes suivant les tailles des poissons. Le parasite *Pseudodactylogyrus sp* est largement dominant dans la classe [50 - 60]cm, avec une forte intensité, puis il diminue progressivement dans les classes de tailles supérieures. Au contraire, *Ergasilus sp* et *Eustrongylides sp* deviennent dominants dans les classes de tailles supérieures cm, avec leur maximum dans la classe [70 - 80]cm. Les autres parasites comme *Bothriocephalus claviceps*, *Anguillicoloides crassus* et les larves Nématodes sont moins intense et plus stables tout au long de la plage de tailles observée.

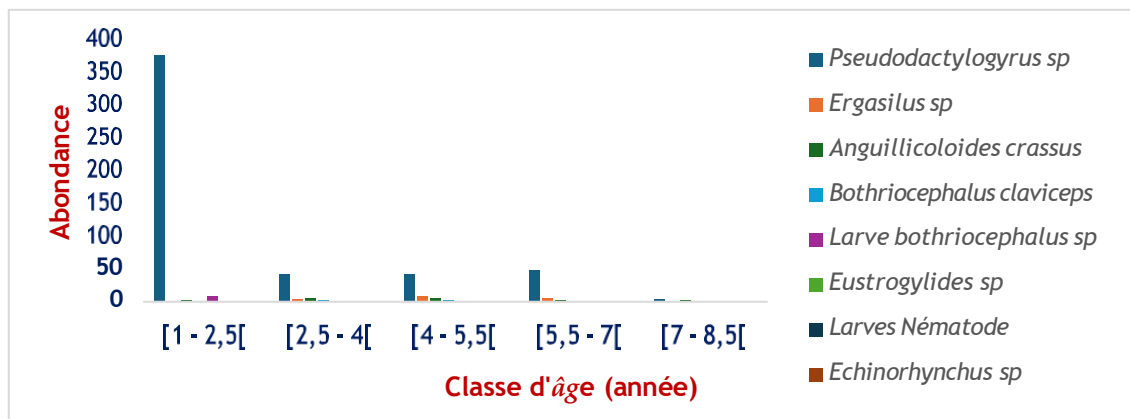


✓ Variation en fonction des classes d'âge :

A



B



C

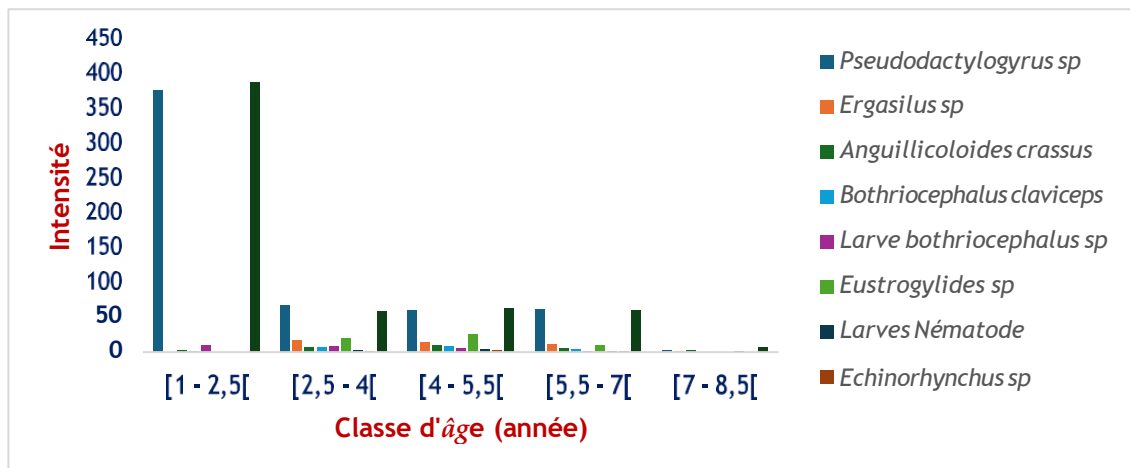


Figure 67 : Variation des indices épidémiologiques : A : Prévalence (P%) ; B : Abondance et C : Intensité moyenne (Im) des parasites communs chez les anguilles de la Mafragh en fonction de leurs classes d'âge



La distribution des parasites chez les anguilles de la Mafragh (**Figure 67 ; A**), révèle des dynamiques complexes selon les classes d'âge. *Pseudodactylogyrus sp* maintient une prévalence constamment élevée (62,16-100%), atteignant 100% chez les jeunes [1-2,5[ et les plus âgés [7-8,5[. *Anguillicoloides crassus* présente également une forte prévalence (54,55- 100%), avec des taux maximums aux extrêmes d'âge. *Bothriocephalus claviceps* montre une prévalence élevée chez les jeunes (100% à [1-2,5[ans) qui diminue progressivement jusqu'à disparaître chez les plus âgés. Les parasites secondaires révèlent des tendances particulières : *Ergasilus sp* voit sa prévalence augmenter avec l'âge (0% à 100%), tandis que les larves de *Bothriocephalus sp* sont surtout présentes chez les jeunes (100% à [1-2,5[ans puis déclinent). *Eustrongylides sp* et *Echinorhynchus sp* montrent des prévalences faibles (<12%), alors que les larves de nématodes présentent une distribution irrégulière avec un pic à 22,22% chez les [4- 5,5[ans.

L'abondance parasitaire (**Figure 67 ; B**) présente des variations marquées selon les classes d'âge. *Pseudodactylogyrus sp* domine largement chez les jeunes anguilles [1-2,5[ans, avec une valeur exceptionnelle de 375 parasites/individu. Il est toutefois important de noter que cette classe d'âge ne comprend qu'un seul individu, ce qui explique cette valeur extrême. Chez les anguilles un peu plus âgées ([2,5-4[ans), l'abondance chute brutalement à 41,78 chez les [2,5-4[ans et se maintient autour de 41-48 jusqu'à [5,5-7[, avant de s'effondrer à 3 chez les plus âgés [7-8,5[. *Anguillicoloides crassus* montre des valeurs stables (4,84-5,58) chez les [2,5-5,5[ puis diminue (2,55-2). *Bothriocephalus claviceps* suit une tendance décroissante continue, passant de 2,65 à 0 parasites/individu. Les larves de *Bothriocephalus sp.*, très abondantes chez les jeunes (9), déclinent rapidement (1,54 à 0,05). *Ergasilus sp* atteint son maximum (8,69) chez les [4-5,5[ans. Les autres parasites (*Eustrongylides sp.*, larves de nématodes, *Echinorhynchus sp.*) présentent des abondances toujours faibles (<1,6), avec des pics chez les classes intermédiaires.

L'analyse de l'intensité parasitaire moyenne chez les anguilles de la Mafragh (**Figure 67 ; C**) révèle des dynamiques complexes selon les classes d'âge. *Pseudodactylogyrus sp* présente une intensité extrêmement élevée (375 parasites/hôte) chez les jeunes [1-2,5[ans représentés par un seul individu, puis diminue brutalement pour se stabiliser autour de 60 chez les adultes avant de chuter à 3 chez les plus âgés. *Anguillicoloides crassus* atteint son pic d'intensité (9,57) chez les [4-5,5[ans, tandis que *Bothriocephalus claviceps* suit une tendance similaire avec un maximum à 8,22 dans la même classe d'âge. Les larves de *Bothriocephalus sp* montrent leurs valeurs les plus fortes chez les jeunes (9 à [1-2,5[ans). *Eustrongylides sp* se distingue par des intensités particulièrement élevées chez les adultes intermédiaires (25,50 à [4-5,5[). *Ergasilus sp* maintient des intensités notables (11-16) entre [2,5-7[, alors que les autres parasites présentent des valeurs plus faibles.



### 3. Analyse statistique :

Le graphique en forêt (Figure 68) illustre les résultats du modèle binomial négatif à inflation de zéro examinant les facteurs influençant l'abondance des parasites. Parmi les différents stades, le stade FIII a montré une abondance parasitaire significativement plus faible par rapport à la catégorie de référence (MII) ( $\beta = -0,8$ , IC à 95 % : -1,4, -0,1,  $p = 0,022$ ). Aucun des autres stades (FII, FIV, I ou MII) n'a montré de différences significatives. En ce qui concerne l'effet du site, Tonga a présenté une abondance parasitaire significativement plus faible par rapport à Mafragh ( $\beta = -1,8$ , IC à 95 % : -3,0, -0,5,  $p = 0,006$ ). Les autres variables, y compris Pt (gr), Lt (mm) et Âge (mois), n'ont pas montré d'effets significatifs. Globalement, ces résultats suggèrent que l'abondance des parasites est significativement influencée par le stade de développement (en particulier FIII) et le site géographique (Tonga).

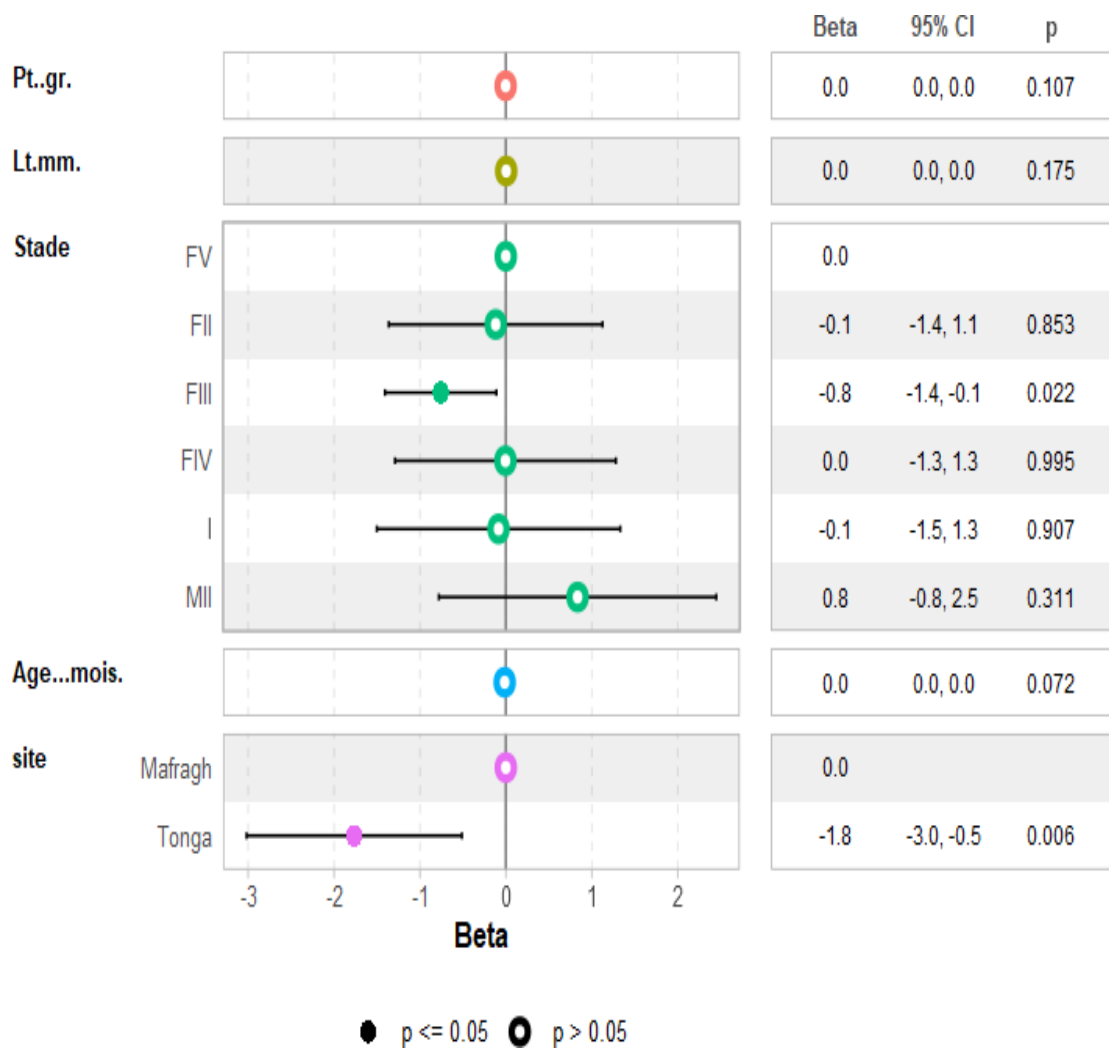


Figure 68 : Résultats du modèle binomial négatif à inflation de zéro examinant les facteurs influençant l'abondance des parasites recensés des anguilles des deux plans d'eau.



Les comparaisons par paires examinent les différences entre les stades de développement en termes de charge parasitaire. (Tableau 16) Le stade FV montre une charge parasitaire significativement plus élevée par rapport à FII ( $p < 0,0001$ ), indiquant que les anguilles au stade FV portent plus de parasites que celles au stade FII.

**Tableau 16 :** Comparaison des charges parasitaires entre les stades de développement des anguilles : Analyse des contrastes par paires et significativité statistique.

Contrast	Estimate	SE	df	z.ratio	p.value
FII - FIII	15.28-	9.01	Inf	1.696-	1
FII - FIV	24.08-	16.5	Inf	1.46-	1
FII - FV	58.46-	11.5	Inf	5.085-	0001.<
FII - I	2.87	3.17	Inf	0.906	1
FII - MII	17.28-	15.43	Inf	1.12-	1
FIII - FIV	8.8-	18.47	Inf	0.477-	1
FIII - FV	43.18-	14.18	Inf	3.045-	0.0349
FIII - I	18.15	8.88	Inf	2.043	0.6162
FIII - MII	2.01-	17.52	Inf	0.115-	1
FIV - FV	34.38-	19.8	Inf	1.736-	1
FIV - I	26.95	16.43	Inf	1.64	1
FIV - MII	6.79	22.32	Inf	0.304	1
FV - I	61.33	11.4	Inf	5.379	0001.<
FV - MII	41.17	18.92	Inf	2.176	0.4433
I - MII	20.16-	15.36	Inf	1.312-	1



De même, FV a une charge parasitaire significativement plus élevée que FIII ( $p = 0,0349$ ), mettant en évidence une différence marquée entre ces stades. De plus, FV présente une charge parasitaire significativement plus élevée par rapport au stade I ( $p < 0,0001$ ). En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les autres stades, y compris les comparaisons entre FII, FIII, FIV, I et MII, suggérant que ces stades ont des charges parasitaires relativement similaires.



**Partie III : Contamination et bioaccumulation métallique chez l'anguille (*A. anguilla*)**

**1. Analyse de la contamination métallique chez *Anguilla anguilla* :**

Ce travail implique une évaluation du degré de contamination, notamment l'accumulation des métaux lourds essentiels (Zn et Fe) et non essentiels (Pb et Cd), dans le foie (en tant qu'organe détoxifiant) et les muscles (en tant que tissus les plus importants pour la consommation humaine), ainsi que leur charge moyenne par rapport au degré d'infestation parasitaire, de 14 anguille européenne (*Anguilla anguilla*) capturée dans chacun des deux sites : le Lac Tonga et l'estuaire du Mafragh. Les concentrations moyennes des métaux traces sont présentées dans le tableau suivant. Ces concentrations sont exprimées en µg de métal / g de poids sec de l'organe (PS).

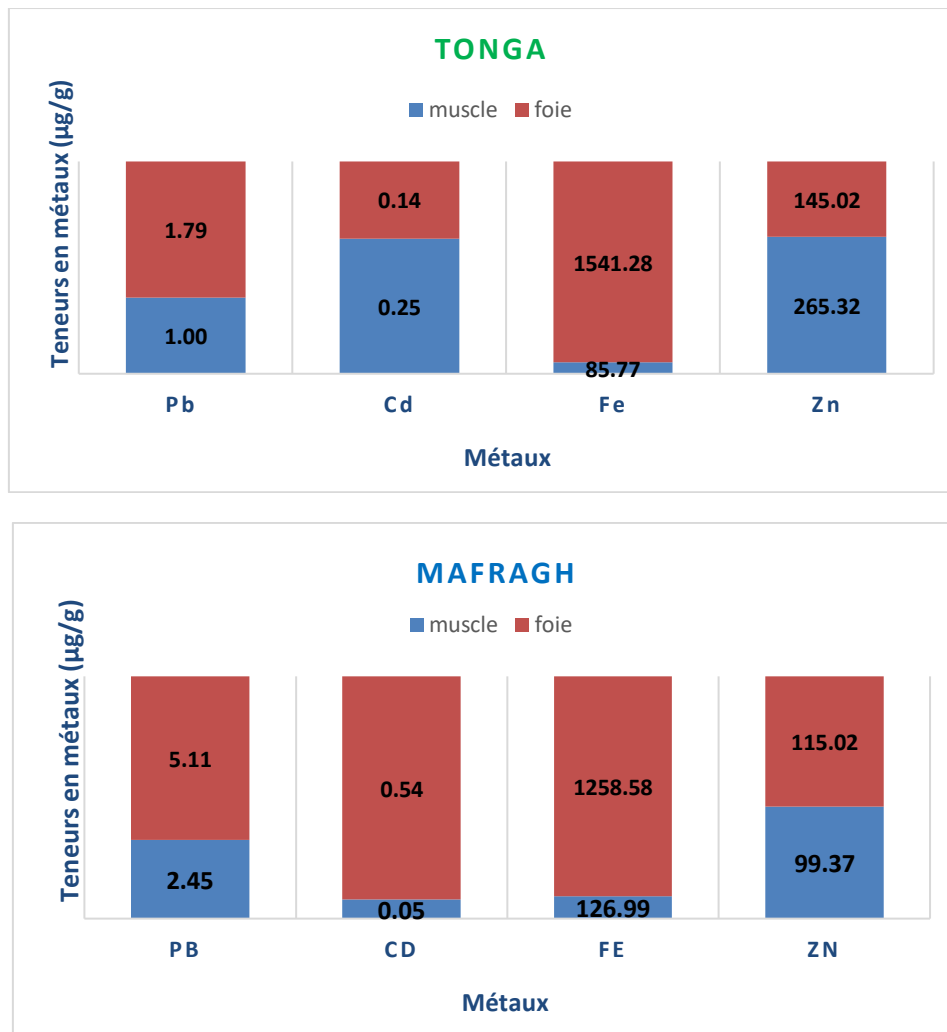
**Tableau 17 :** Sommaire des concentrations en métaux lourds, de la répartition organique et selon l'infestation parasitaire chez *Anguilla anguilla* dans deux sites d'étude (Mean ± SD).

	Site		Organe		Degré d'infestation	
	Mafragh	Tonga	Foie	Muscle	Moins parasité	Parasité
<b>Pb</b>	3.14±1.15	1.39 ±1.08	2.44±1.50	2.10±1.33	1.93±1.90	2.86±1.09
<b>Cd</b>	0.31±0.39	0.18± 0.12	0.34±0.37	0.14±0.15	0.21±0.31	0.36±0.36
<b>Fe</b>	765±1680.73	783.84±764.06	1446 ±1565	103.25±37.43	1161±2019	674.98±762.42
<b>Zn</b>	126.71±80.39	202.39±135.36	147.89±91.07	181.21±137.6	123.79±95.8	201.17±145.10

Les anguilles examinées de l'estuaire de Mafragh présentent de plus fortes concentrations de Pb et de Cd comparées à celles de lac Tonga. En revanche, lac Tonga affiche une concentration plus élevée en Fe et en Zn, ce qui peut être attribué à la nature géochimique du site et à la biodisponibilité des différents métaux. L'accumulation des métaux lourds est stratifiée selon les degrés de tissus analysés. Le foie reste l'organe avec les plus fortes concentrations en éléments toxiques, surtout en plomb et en cadmium, entre autres, et qui est d'emblée particulièrement élevé du fait du rôle qu'il joue dans le métabolisme et la détoxification. En contraste, les muscles ont des concentrations plus faibles pour ces éléments, même si le zinc est un peu plus présent du fait de son rôle physiologique dans la contraction musculaire et dans l'immunité.



➤ Concentration moyenne en métaux traces : Pb, Cd, Fe et Zn :



**Figure 69** : Concentration moyenne en métaux traces : Pb, Cd, Fe et Zn ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans le muscle et le foie des anguilles du lac Tonga et l'estuaire de la Mafragh.

Les résultats de notre étude révèlent que le foie des anguilles capturée au lac Tonga présente des concentrations élevées de plomb ( $1,79 \mu\text{g/g}$ ) et de fer ( $1541,28 \mu\text{g/g}$ ), ce qui confirme son rôle essentiel dans la détoxification et le stockage de ces principaux métaux. En revanche, le cadmium ( $0,25 \mu\text{g/g}$ ) et le zinc ( $265,32 \mu\text{g/g}$ ) se trouvent en plus grande quantité dans le muscle, suggérant des mécanismes d'accumulation distincts pour ces éléments. Tandis qu'à la Mafragh on révèle des différences notables dans leur distribution. Le foie accumule des concentrations particulièrement élevées de plomb ( $5,11 \mu\text{g/g}$ ) et de fer ( $1258,58 \mu\text{g/g}$ ). En comparaison, les niveaux de plomb ( $2,45 \mu\text{g/g}$ ) et de fer ( $126,99 \mu\text{g/g}$ ) sont plus faibles dans le muscle. En revanche, le cadmium est présent en plus grande quantité dans le foie ( $0,54 \mu\text{g/g}$ ) par rapport au muscle ( $0,05 \mu\text{g/g}$ ), tandis que les concentrations de zinc montrent une légère augmentation dans le foie ( $115,02 \mu\text{g/g}$ ) par rapport au muscle ( $99,37 \mu\text{g/g}$ ).

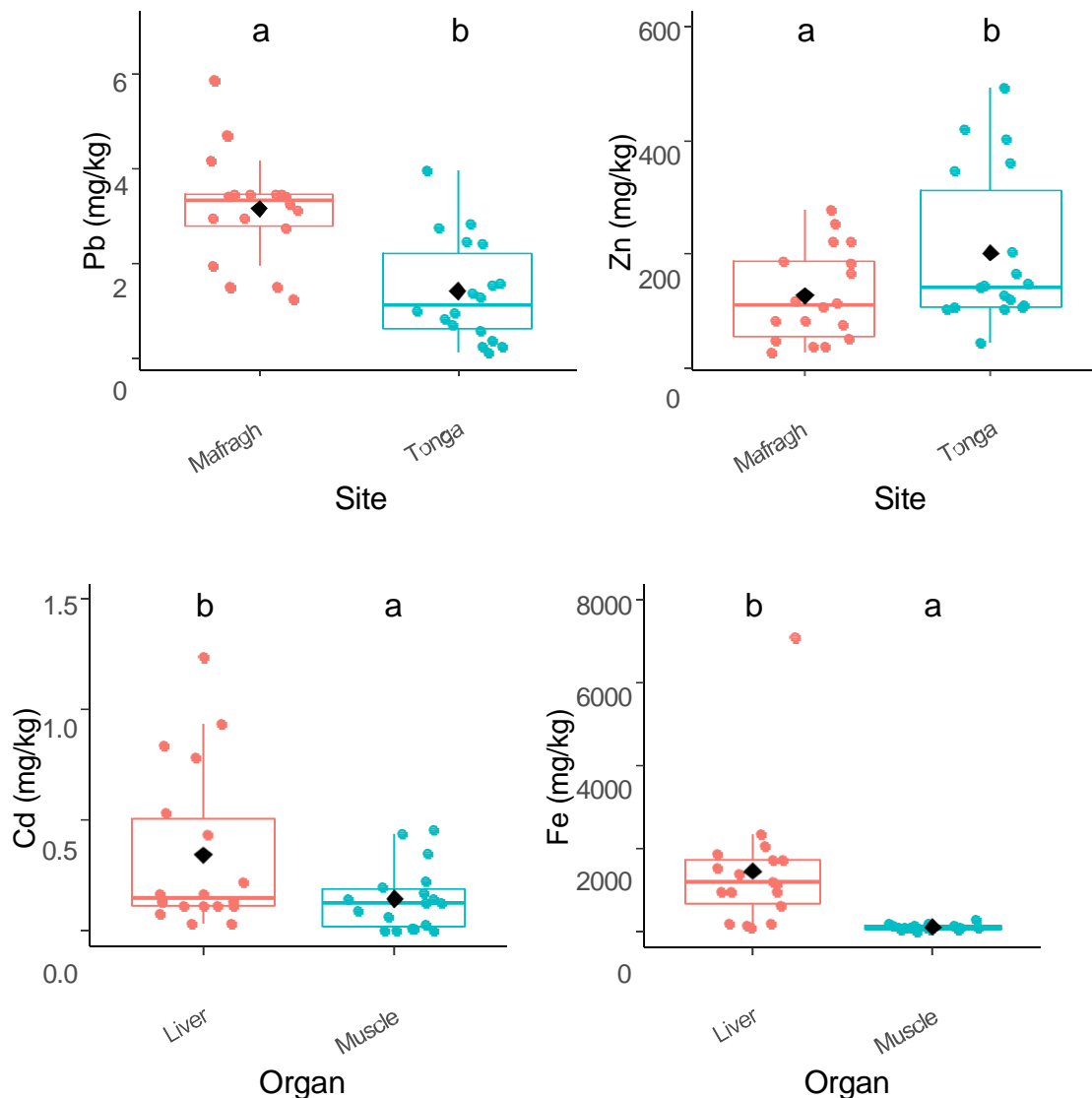


Les résultats de l'application du test de Fisher (ANOVA à un facteur) (Tableau 18), révèlent que : le facteur site, influence la bioaccumulation du plomb seulement, ( $P= 0.000$  : différences très hautement significatives entre les sites). Cependant, le facteur organe influence la bioaccumulation du fer et du cadmium ( $P=0.000$ ,  $p=0.03$ , successivement).

*Tableau 18* : Comparaison inter-sites, inter-organes et selon le degré d'infestation.

Variable	Site		Organe	
	F	P-value	F	P-value
<b>Pb</b>	21.97	0.000***	0.51	0.480
<b>Cd</b>	1.79	0.189	4.79	0.035*
<b>Fe</b>	0.00	0.966	13.21	0.000***
<b>Zn</b>	4.15	0.05	0.73	0.398

**( $P \leq 0,05$ )\*, ( $P \leq 0,01$ )\*\* et ( $P \leq 0,001$ )\*\*\***



**Figure 70 :** Variations inter-sites, inter-organe et selon le degré d'infestation concernant les métaux lourds et le type de parasite.

A et b indiquent que la variation spatio-temporelle est significative à  $p < 0,05$ , en utilisant le test de Tukey. Les boîtes à moustaches étiquetées avec la même lettre ne sont pas significativement différentes à  $p > 0,05$ . Les limites de la boîte centrale montrent la plage interquartile (IQR) avec le premier quartile (borne inférieure) et le troisième quartile (borne supérieure). Les valeurs aberrantes sont indiquées par de petits cercles.



➤ Relation entre les contaminants étudiés et la charge parasitaire :

Le calcul du coefficient de corrélation paramétrique de Pearson, indique que le plomb présente une corrélation positive très hautement significative avec le nombre de parasites ( $r = 0.54$ ,  $P = 0.000$ ). Alors que le fer présente une corrélation positive mais pas significative avec le cadmium (Figure 71).

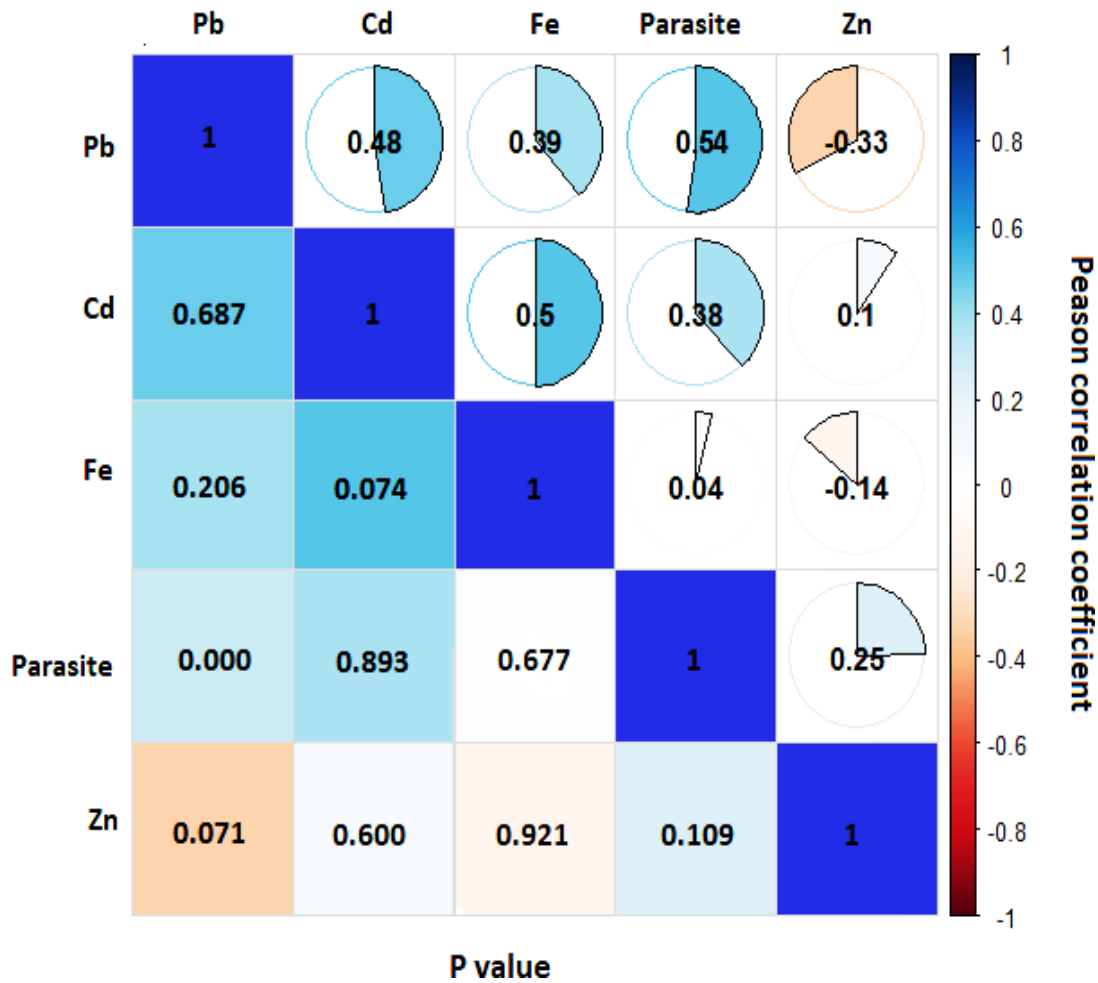
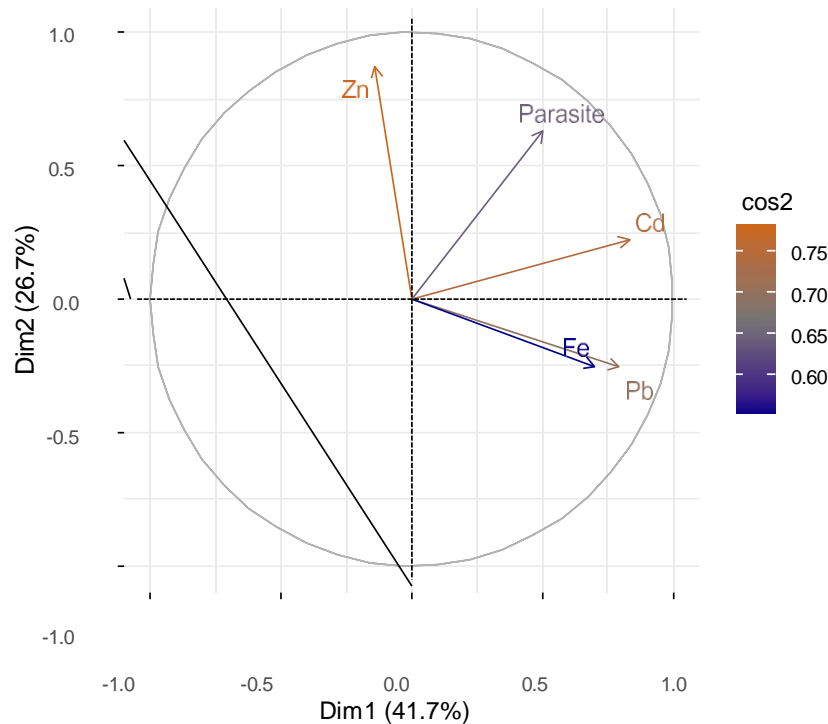


Figure 71 : Corrélation de Pearson entre la contamination aux métaux lourds et l'infestation parasitaire chez *Anguilla anguilla*.



➤ **La variation globale de la contamination métallique :**

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de visualiser la structuration de la variation inter-sites, inter-organe et d'infestation d'un ensemble de variables. Cette analyse révèle que de la variation totale de notre matrice des variables est expliqué par les deux premières composantes principales (**Figure 72**).



**Figure 72 :** Analyse en composante principale des différents paramètres étudiés.

La **Figure 73** révèle que le 1<sup>er</sup> axe d'ACP explique lui seul **41.73%** de l'inertie totale, il est corrélé positivement avec les variables suivantes : parasite ( $r = 0.50$ ), Pb ( $r = 0.79$ ), Cd ( $r = 0.83$ ) et Fe ( $r = 0.70$ ). Cet axe exprime clairement l'existence d'une structuration spatiale et inter-organe, entre l'estuaire du Mafragh et le foie coté positive, et lac Tonga et muscle côté négatif. En effet, la bioaccumulation des métaux lourds (Pb, Cd et Fe) et l'infestation des poissons de la Mafragh sont plus important par rapport aux poissons du lac Tonga. En revanche, la bioaccumulation de Pb, Cd et Fe au niveau du foie est élevée par rapport au muscle.

Concernant le 2<sup>eme</sup> axe d'ACP explique lui seul **26.74%** de la variation totale, il est corrélé positivement avec les variables suivantes : Zn ( $r = 0.87$ ) et parasite ( $r = 0.63$ ). Cet axe exprime clairement l'existence d'une structuration concernant le degré d'infestation. En effet, les poissons infestés par *Pseudodactylogyrus sp* situe au côté positive sont des bons bioaccumulateurs au Zn et hébergent un nombre élevé de parasites par rapport aux poissons



infestées par *Bothriocephalus claviceps* et les poissons les moins infestées (situé sur le côté négatif) (Figure 73).

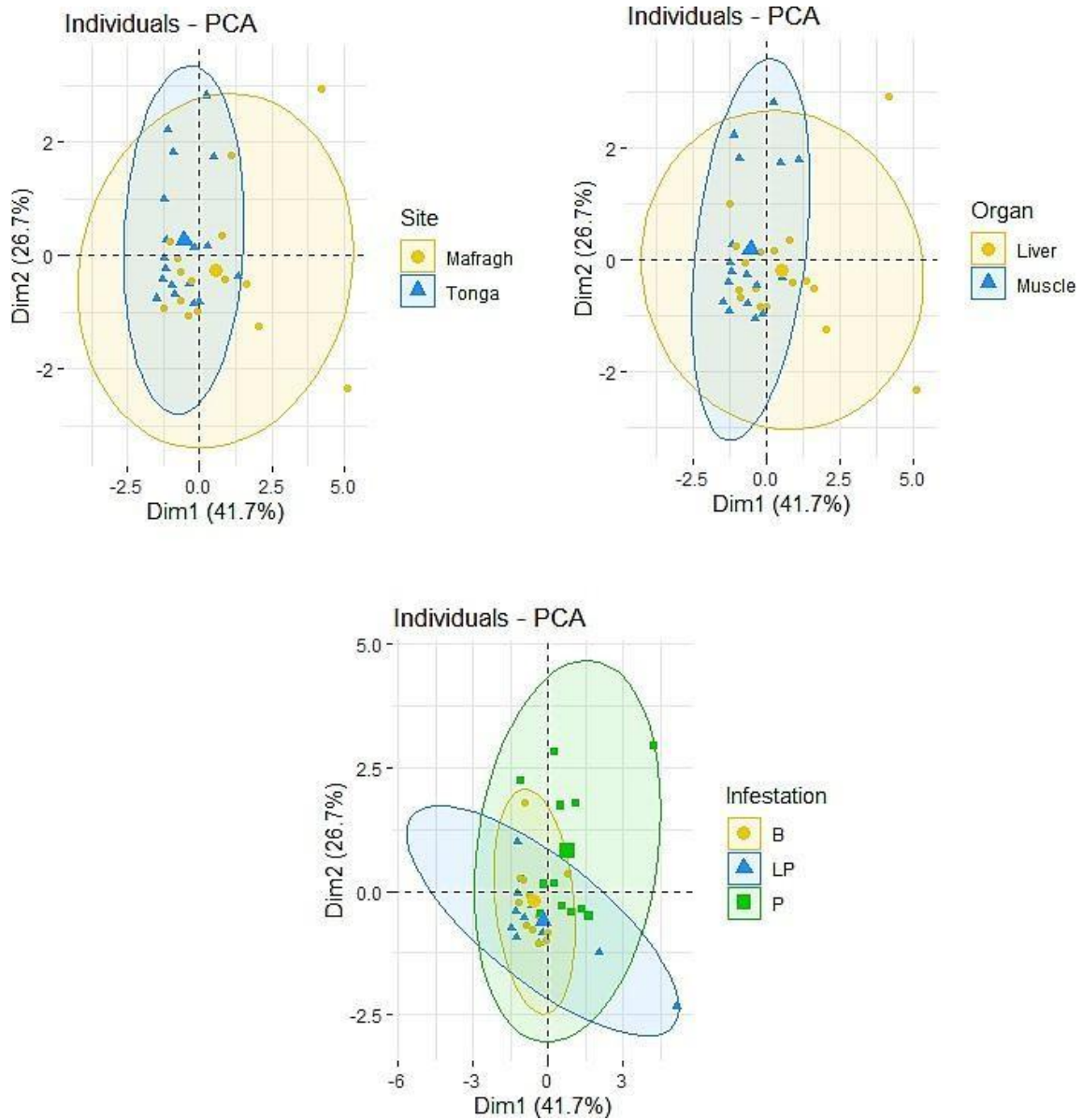
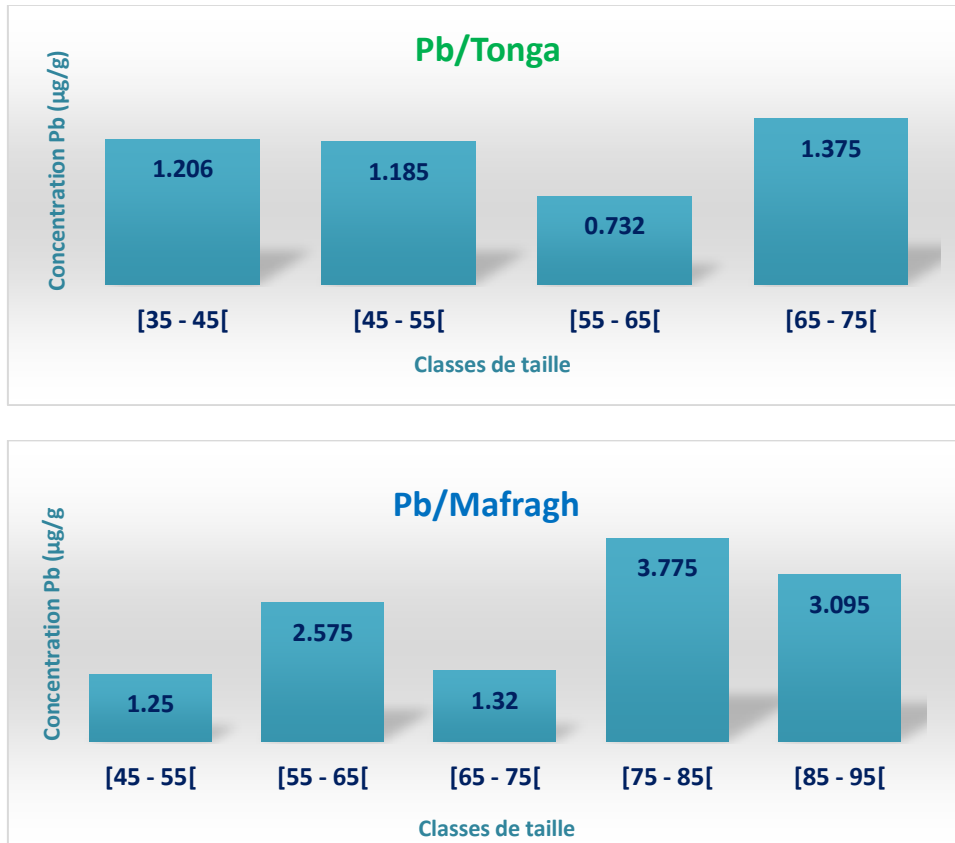


Figure 73 : Analyse en composantes principales (ACP) des individus selon le site, l'organe et le degré d'infestation chez *Anguilla anguilla*.



## 2. Le plomb (Pb) :

### ➤ Teneurs en fonction des classes de taille :

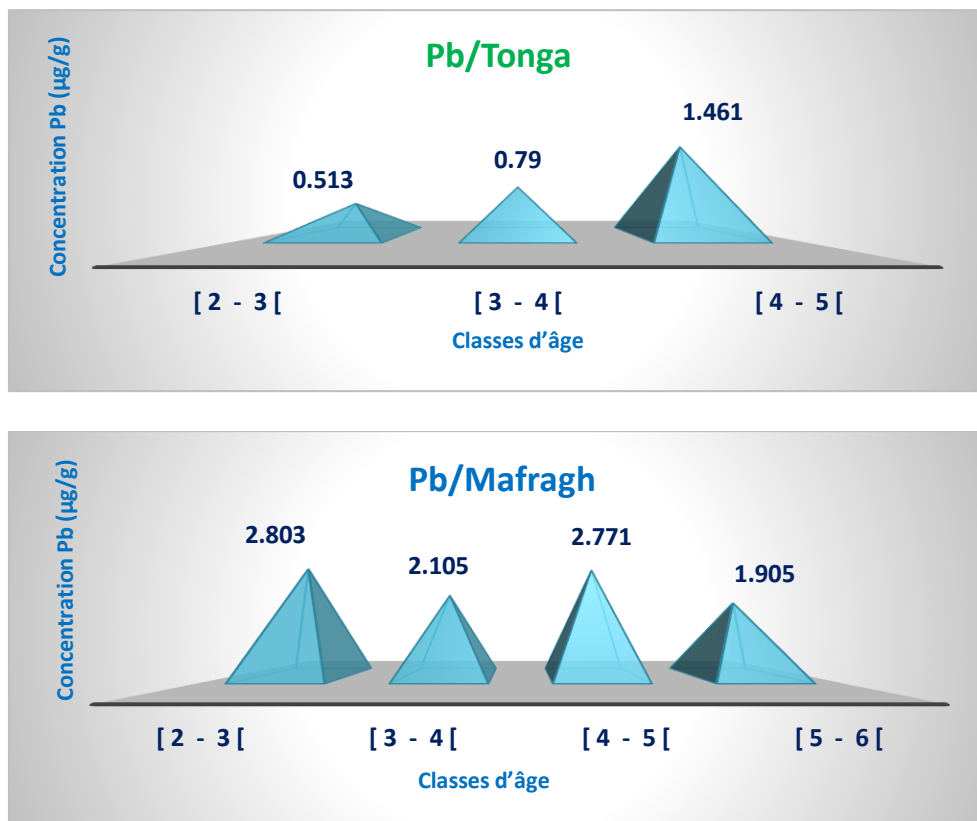


**Figure 74 :** Variation de concentration en Pb ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille.

La concentration de Pb dans les muscles des anguilles du lac Tonga est variable en fonction des classes de taille (**Figure 74**) ; Cependant, il existe une tendance générale à une diminution de cette concentration avec une augmentation de la taille individuelle et qui n'est pas uniforme. Les teneurs moyennes de Pb dans la classe de taille de [55-65[cm sont les plus faibles de 0,732  $\mu\text{g/g}$  PS, et les plus forte à la dernière classe de taille de 1,375  $\mu\text{g/g}$  PS. Tandis que chez l'anguille de la Mafragh, avec l'augmentation de la classe de taille, on observe une tendance générale à une augmentation de la teneur en Pb. La classe de taille [75-85[cm présente la teneur en Pb la plus élevée de 3,095  $\mu\text{g/g}$  PS.



➤ Teneurs en fonction des classes d'âge :



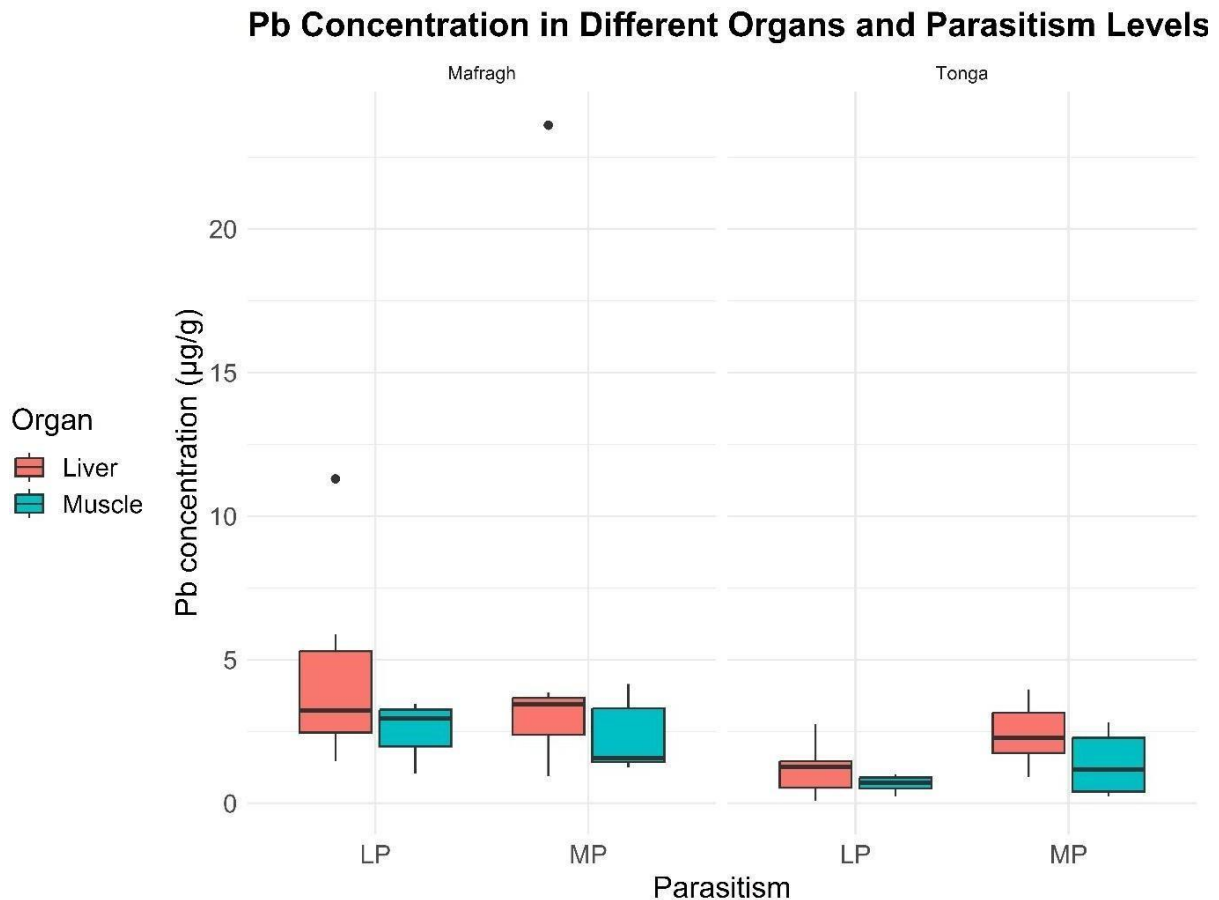
**Figure 75 :** Variation de concentration en Pb ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes d'âge

Les teneurs en plomb (Pb) dans les muscles des anguilles des deux sites, montrent des différences marquées en fonction des classes d'âge. Pour les anguilles du lac Tonga, les concentrations de plomb augmentent avec l'âge, passant de  $0,51 \mu\text{g/g}$  dans la petite classe d'âge [2-3[ans, à la plus grande classe de  $1,46 \mu\text{g/g}$ . En revanche, les anguilles de la Mafragh présentent des niveaux de plomb plus élevés mais en variabilité différente. La concentration de plomb la plus élevée est révélée chez les plus jeunes anguilles de  $2,80 \mu\text{g/g}$  dans la classe d'âge [2-3[ans.

Les anguilles moins parasitées ont une concentration de Pb de  $2,56 \mu\text{g/g}$ , tandis que celles plus parasitées affichent une concentration légèrement inférieure de  $2,35 \mu\text{g/g}$ . Cela pourrait indiquer que le parasitisme n'a pas un impact significatif sur la concentration de Pb dans les muscles. Pour le foie, les anguilles moins parasitées présentent une concentration de  $4,50 \mu\text{g/g}$ , tandis que celles plus parasitées montrent une concentration de  $5,73 \mu\text{g/g}$ . Cela suggère que le niveau de parasitisme pourrait être lié à une augmentation de la concentration de Pb dans le foie.



➤ Teneurs en fonction d'organes, de sites et de degré de parasitisme :



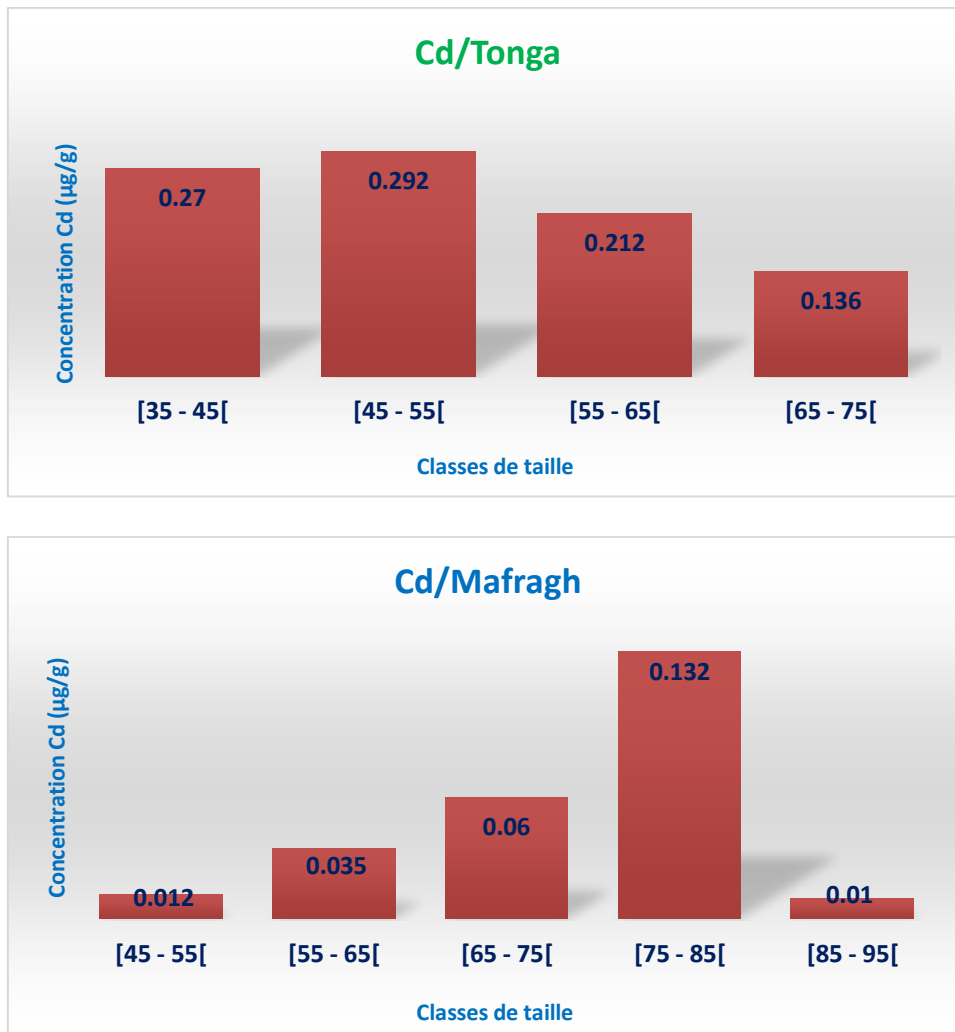
**Figure 76 :** La concentration moyenne de plomb (Pb en µg/g poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasitées) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.

La **figure 76**, sous forme de boîtes à moustaches montre clairement que le foie accumule davantage de plomb que le muscle, ce qui n'est pas surprenant au vu du rôle central de cet organe dans les mécanismes de détoxification. À Tonga, la différence est assez marquée entre les anguilles les plus et les moins parasitées, en particulier au niveau musculaire : on observe une concentration plus du double chez les individus les plus infectés. Ce contraste pourrait traduire un lien entre le parasitisme et la capacité d'absorption ou de rétention du plomb, mais cela mérite d'être approfondi. À Mafragh, les concentrations sont globalement plus élevées dans le foie, en particulier chez les anguilles les plus parasitées, avec des écarts types importants, ce qui suggère une forte variabilité individuelle ou environnementale.



### 3. Le cadmium Cd :

➤ Teneurs en fonction des classes de taille :

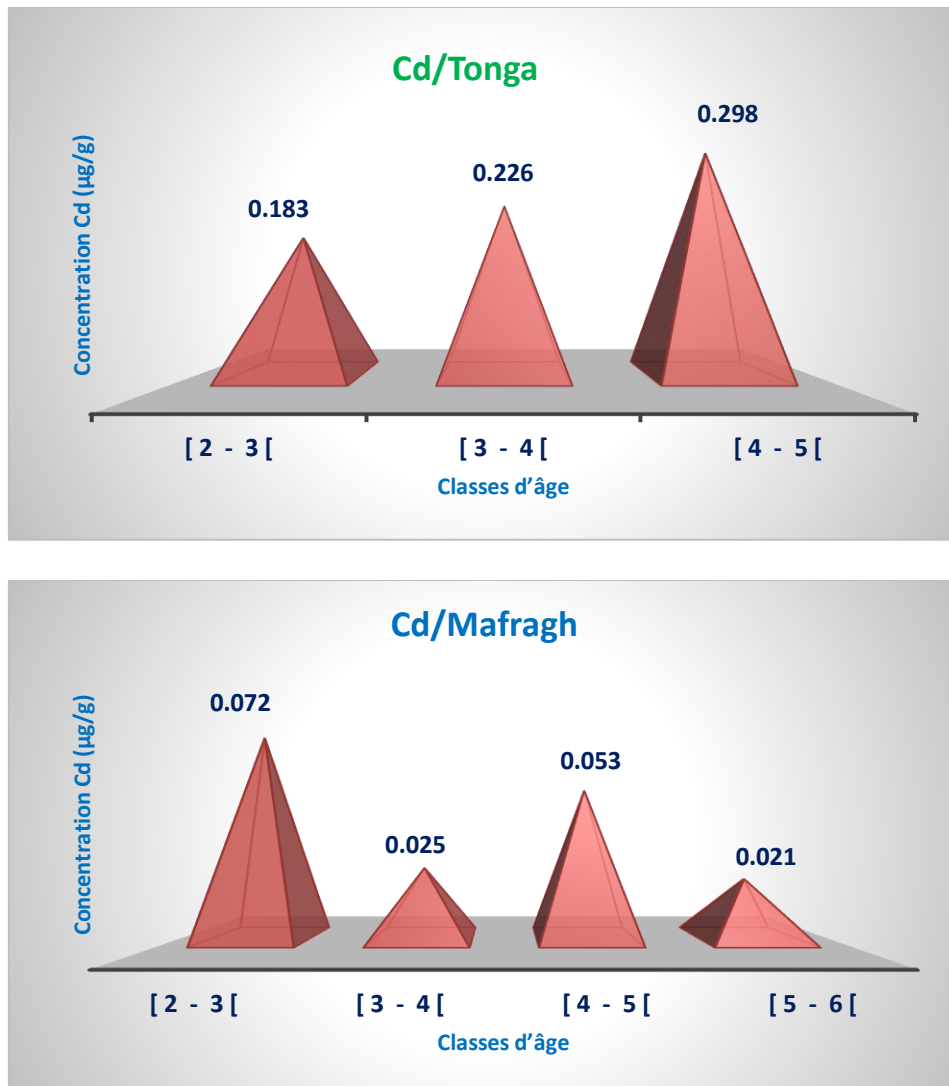


**Figure 77 :** Variation de concentration en Cd ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille

Les quantités de cadmium (Cd) présentes dans les muscles des anguilles des deux sites, varient selon les classes de taille. Les concentrations du Cd diminuent avec l'augmentation de la taille des anguilles du lac Tonga, passant de  $0,27 \mu\text{g/g}$  dans la classe de taille  $[35-45[$  à  $0,136 \mu\text{g/g}$  dans la classe  $[65-75[$ . Par contre, les niveaux de Cd chez les anguilles de l'estuaire du Mafragh augmente avec l'augmentation de la taille. Car ils atteints un minimum de  $0,012 \mu\text{g/g}$  dans la classe  $[45-55[$ , tandis qu'elle augmente à  $0,132 \mu\text{g/g}$  dans l'avant dernière classe, et s'effondre jusqu'à  $0,01 \mu\text{g/g}$  dans la catégorie  $[85-95[$ .



➤ Teneurs en fonction des classes d'âge :

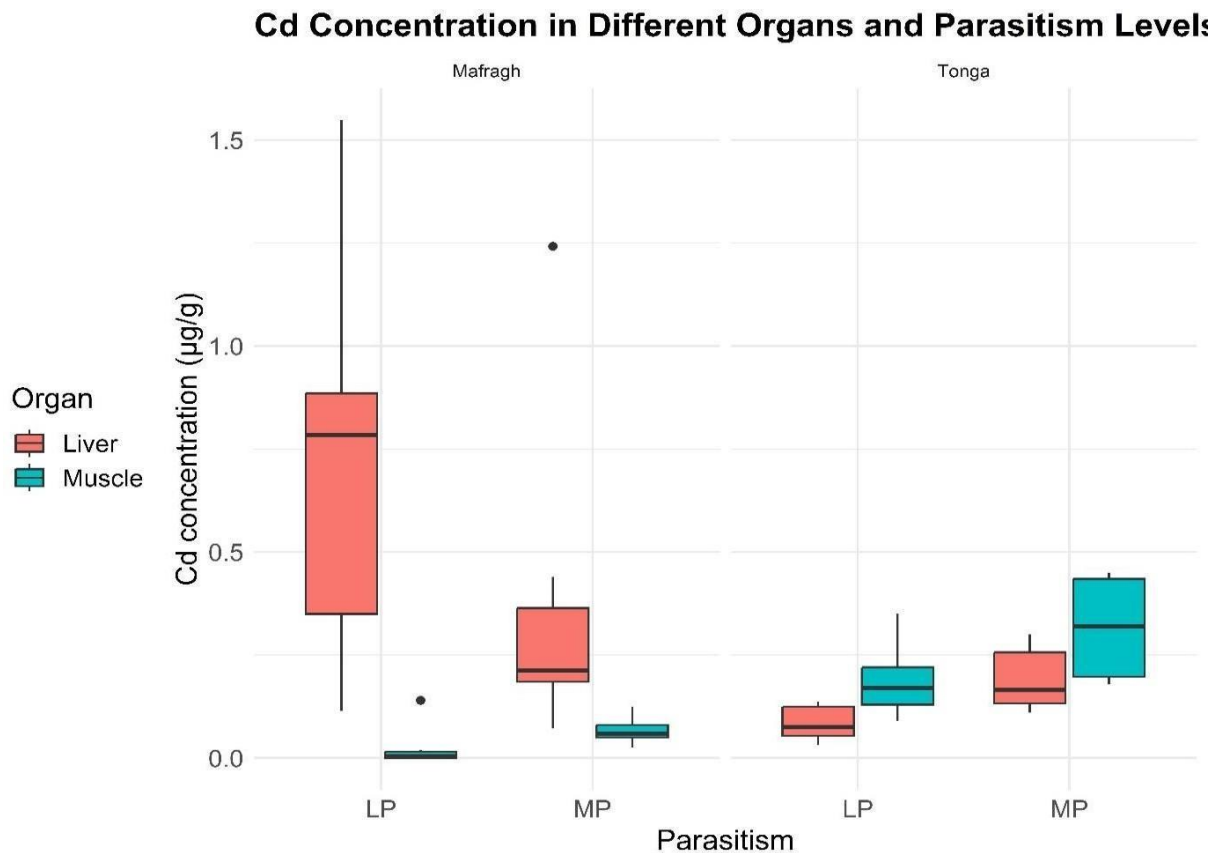


**Figure 78 :** Variation de concentration en Cd ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes d'âge

Les teneurs en cadmium (Cd) dans les muscles des anguilles des deux sites, montrent des différences importantes en fonction des classes d'âge. À Tonga, ces concentrations augmentent avec l'âge des anguilles, passant de  $0,183 \mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [2-3[ans à  $0,298 \mu\text{g/g}$  pour la dernière classe. En revanche, Les concentrations de Cd sont plus faibles et relativement constantes chez les anguilles de l'estuaire du Mafragh, passant de  $0,072 \mu\text{g/g}$  dans la classe d'âge [2-3[ans à  $0,053 \mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [4-5[ans, et une légère baisse à  $0,021 \mu\text{g/g}$  pour les anguilles plus âgées de la classe [5-6[ans.



➤ Teneurs en fonction d'organes, de sites et de degré de parasitisme :



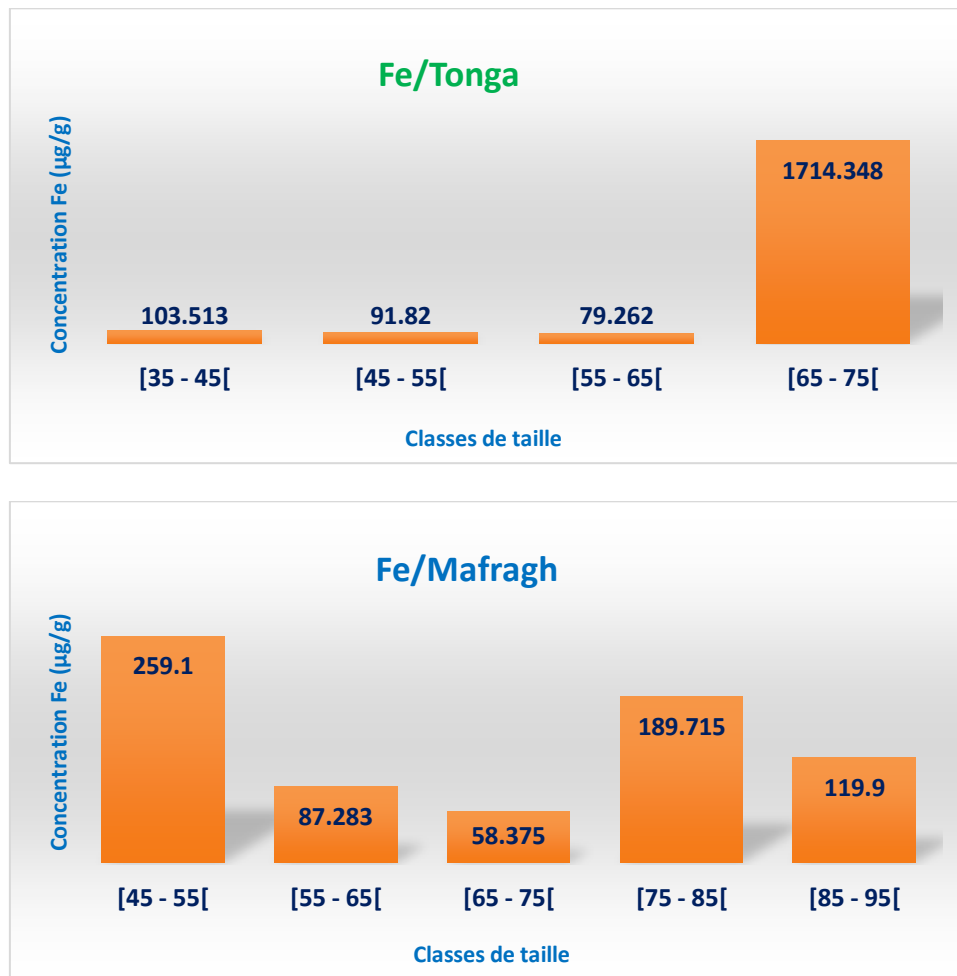
**Figure 79 :** La concentration moyenne du Cadmium (Cd en µg/g poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasités) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.

Le cadmium, bien que présent à des concentrations globalement faibles, révèle quelques tendances intéressantes (figure 79). À Tonga, les anguilles les plus parasitées présentent une concentration musculaire plus élevée que les moins atteintes, ce qui pourrait indiquer une altération des mécanismes d'excrétion ou une exposition différente. En revanche, à Mafragh, c'est dans le foie des moins parasitées que l'on retrouve les valeurs les plus élevées. Ce résultat un peu contre-intuitif soulève des questions sur le rôle du parasitisme dans la régulation ou la mobilisation du Cd, mais aussi sur d'éventuels effets d'âge, de régime alimentaire, ou de phase du cycle biologique.



#### 4. Le fer (Fe) :

##### ➤ Teneurs en fonction des classes de taille :

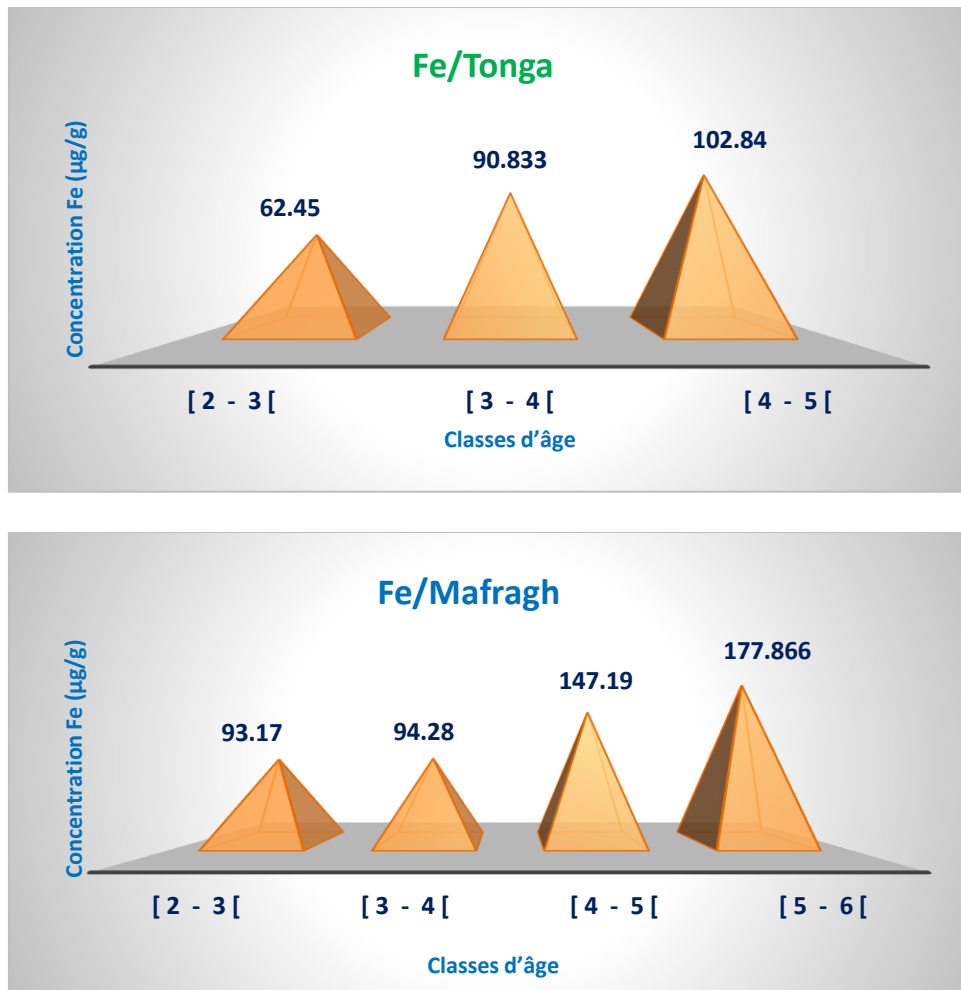


**Figure 80 :** Variation de concentration en Fe ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille.

Dans le lac Tonga, les concentrations de Fe montrent des variations importantes avec la taille des anguilles, passant de 103,513  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [35 - 45[, et en diminuant jusqu'à 79,262  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [55 - 65[. Cependant, il y a une augmentation remarquable pour la classe de taille [65 - 75[, atteignant 1714,348  $\mu\text{g/g}$ . Tandis qu'à l'estuaire de la Mafragh, les concentrations de Fe varient également avec la taille des anguilles : elles sont de 259,1  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [45 - 55[, diminuent jusqu'à 58,375  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [65 - 75[. Cependant, ces concentrations augmentent de nouveau, atteignant 189,715  $\mu\text{g/g}$  et 119,9  $\mu\text{g/g}$  pour les tailles les plus grandes.



➤ Teneurs en fonction des classes d'âge :

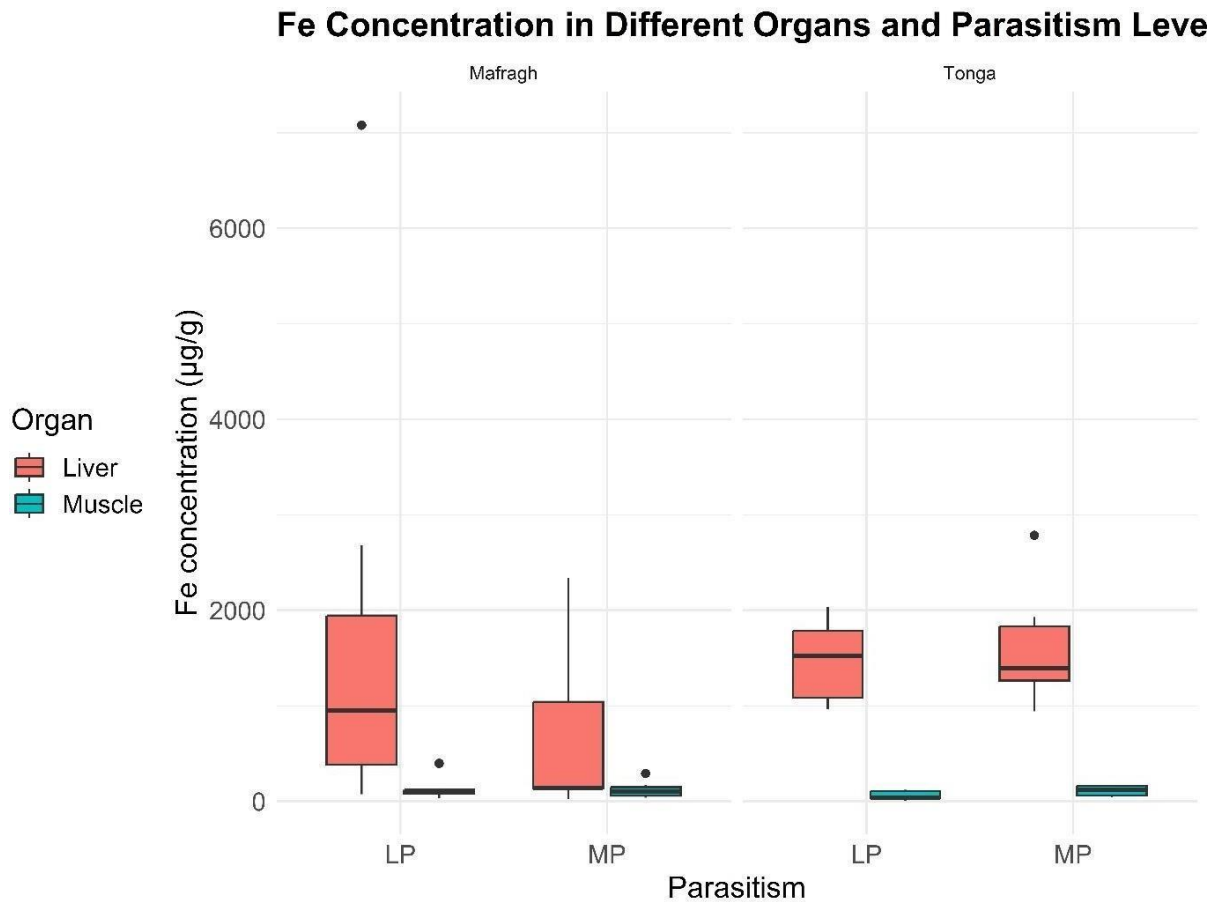


**Figure 81 :** Variation de concentration en Fe ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille

La concentration en fer dans les muscles des anguilles varie en fonction de l'âge pour les deux sites étudiés. Dans le lac Tonga, les concentrations de Fe augmentent avec l'âge des anguilles, passant de 62,45  $\mu\text{g/g}$  à 102,84  $\mu\text{g/g}$ . En outre, une tendance similaire est observée chez les anguilles de l'estuaire de la Mafragh, avec une augmentation notable des concentrations de Fe avec l'âge des anguilles, commençant à 93,17  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [2 - 3[ jusqu'à atteindre la plus haute concentration de Fe à 177,866  $\mu\text{g/g}$  pour les anguilles les plus âgées. En comparaison, les anguilles de la Mafragh montrent globalement des concentrations de Fe plus élevées que celles du lac Tonga, particulièrement dans les classes d'âge plus avancées.



➤ Teneurs en fonction d'organes, de sites et de degré de parasitisme :



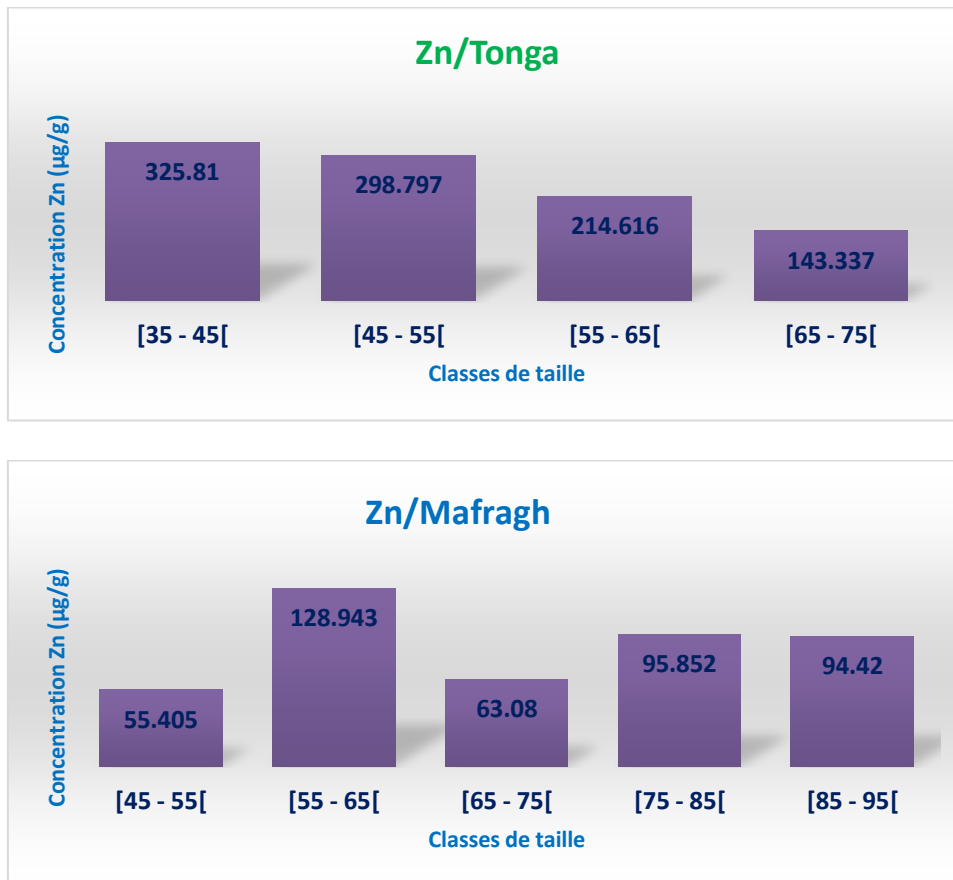
**Figure 82 :** La concentration moyenne du Fer (Fe en µg/g poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasitées) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.

Comme attendu, le fer est retrouvé en plus grande quantité dans le foie que dans le muscle, ce qui reflète son stockage physiologique normal. Les niveaux les plus élevés sont observés chez les anguilles moins parasitées de Mafragh, avec toutefois des écarts très importants, témoignant sans doute d'une grande hétérogénéité entre les individus. À Tonga, les individus les plus parasités semblent accumuler plus de fer dans le muscle, ce qui pourrait être lié à une activation des processus immunitaires — le fer étant un élément clé dans la réponse aux infections. Cela dit, il ne faut pas exclure des facteurs confondants comme l'état nutritionnel ou l'exposition environnementale au Fe dissous.



## 5. Le zinc (Zn) :

### ➤ Teneurs en fonction des classes de taille :

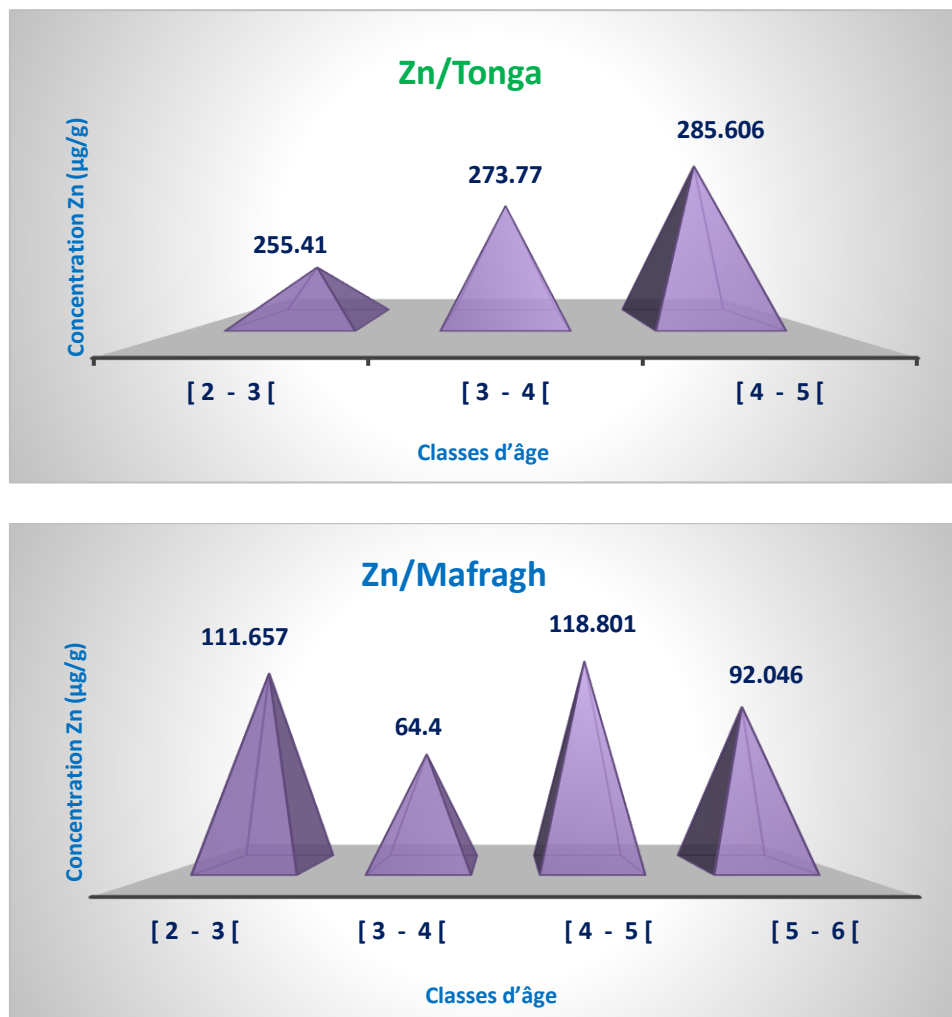


**Figure 83 :** Variation de concentration en Zn ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes de taille

Les anguilles du lac Tonga montrent une diminution constante de la concentration de Zn avec l'augmentation de la taille, tandis que celles de l'estuaire de la Mafragh présentent des fluctuations plus complexes, avec des concentrations de Zn globalement plus faibles et des variations non linéaires en fonction de la taille. Dans le lac Tonga, les concentrations de Zn diminuent régulièrement avec l'augmentation de la taille des anguilles, passant de 325,81  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [35 - 45[, à 298,797  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [45 - 55[, puis à 214,616  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [55 - 65[, et atteignant 143,337  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [65 - 75[. En outre, à l'estuaire de la Mafragh, les concentrations de Zn montrent des variations différentes selon la taille des anguilles. Elles sont de 55,405  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [45 - 55[, augmentent à 128,943  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [55 - 65[, puis diminuent à 63,08  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [65 - 75[, avant d'augmenter de nouveau à 95,852  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [75 - 85[, et enfin atteignent 94,42  $\mu\text{g/g}$  pour la classe de taille [85 - 95[.



➤ Teneurs en fonction des classes d'âge :

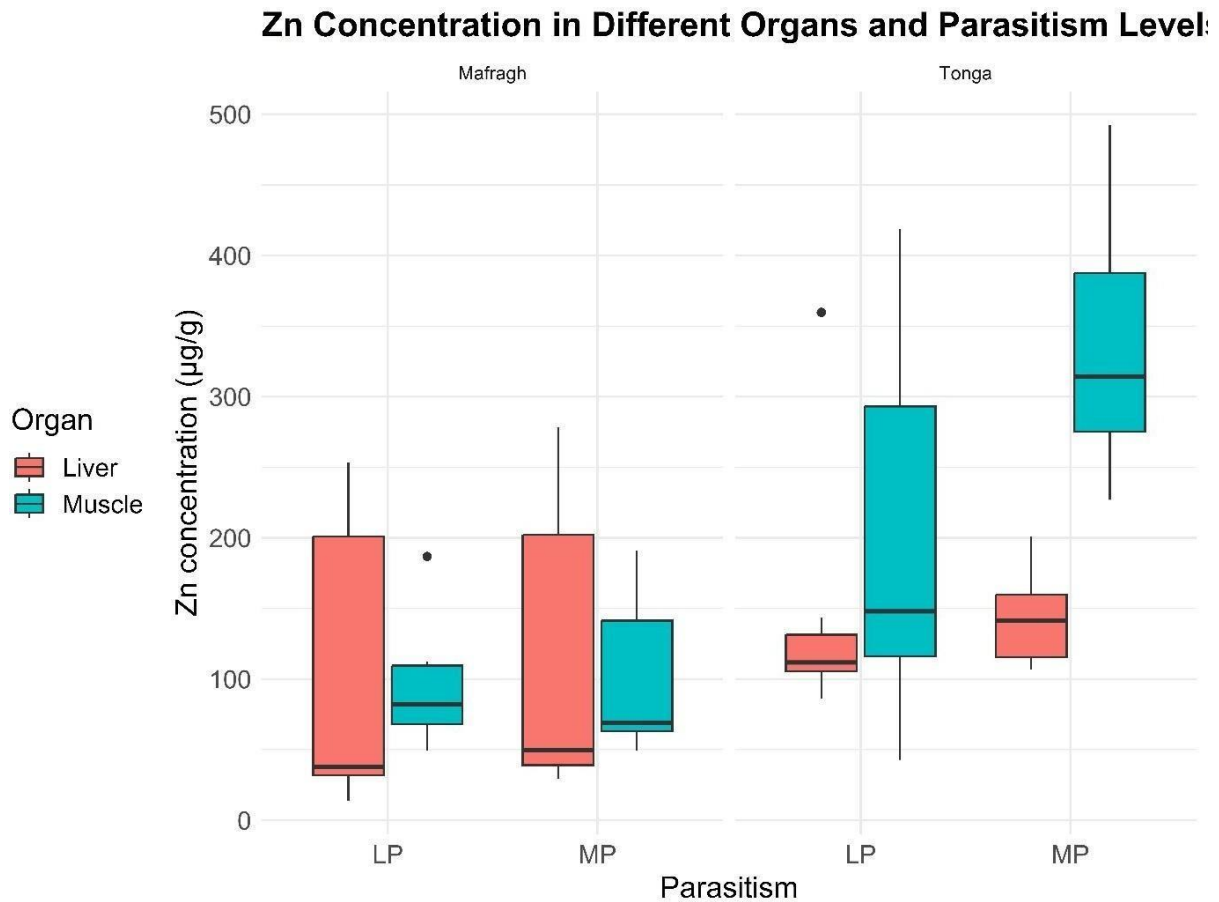


**Figure 84 :** Variation de concentration en Zn ( $\mu\text{g/g}$  poids sec : PS) dans les muscles des anguilles des deux sites par leurs classes d'âge.

Dans le lac Tonga, les concentrations de Zn augmentent avec l'âge des anguilles, passant de 255,41  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [2 - 3[, à 273,77  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [3 - 4[, et atteignant 285,606  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [4 - 5[. Tandis qu'à l'estuaire de la Mafragh, les concentrations de Zn montrent des variations avec l'âge des anguilles : elles sont de 111,657  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [2 - 3[, diminuent à 64,4  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [3 - 4[, augmentent à 118,801  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [4 - 5[, puis diminuent de nouveau à 92,046  $\mu\text{g/g}$  pour la classe d'âge [5 - 6[. En résumé, les anguilles du lac Tonga montrent une augmentation régulière de la concentration de Zn avec l'âge, tandis que celles de l'estuaire de la Mafragh présentent des variations plus complexes, avec des concentrations de Zn globalement plus faibles et des fluctuations non linéaires en fonction de l'âge.



➤ Teneurs en fonction d'organes, de sites et de degré de parasitisme :



**Figure 85 :** La concentration moyenne du Zinc (Zn en µg/g poids sec : PS) dans différents organes (muscle et foie) et niveaux de parasitisme (les plus et les moins parasitées) des anguilles des deux sites : lac Tonga et l'estuaire du Mafragh.

Le zinc présente un profil plus complexe, avec des variations marquées selon l'organe et le site. À Tonga, le muscle semble être le principal site d'accumulation, surtout chez les individus les plus parasités, ce qui pourrait refléter une perturbation des mécanismes de régulation. Fait intéressant, les niveaux hépatiques de Zn y sont relativement stables entre les deux groupes, ce qui suggère une certaine robustesse de la régulation hépatique face au stress parasitaire. À Mafragh, les concentrations sont plus faibles dans l'ensemble, tant dans le muscle que dans le foie, et assez proches entre les groupes. Cela pourrait indiquer une exposition environnementale plus modérée ou une dynamique de régulation différente dans ce site.



**Axe I : Structure de la sous population d'anguilles européenne : Croissance et Argenture**

Dans le lac Tonga, l'analyse de la distribution des classes de taille montre une prédominance marquée des individus mesurant entre 450 et 550 mm, lesquels représentent environ 24 % de l'ensemble de la population échantillonnée. Cette structure de taille rappelle les observations rapportées par [Ladjama \(2016\)](#) dans ce même milieu, où les anguilles dont la taille se situait entre 370 et 570 mm constituaient plus de 80 % des captures. Cette concentration autour des tailles moyennes reflète une population globalement stable, caractérisée par une dynamique de croissance modérée, accompagnée d'une faible représentation des individus de grande taille. En revanche, dans l'estuaire du Mafragh, la structure de taille se distingue nettement par une prédominance des anguilles comprises entre 630 et 690 mm, représentant près de 47 % des spécimens étudiés. Cette différence inter-site dans la répartition des tailles pourrait être attribuée à des facteurs environnementaux spécifiques à chaque écosystème, notamment la salinité, la productivité du milieu, ou la disponibilité des proies. Des résultats similaires ont été rapportés par [Tahri \(2016\)](#) dans le lac Oubeïra, où les anguilles de grande taille, comprises entre 700 et 800 mm, étaient majoritaires. Cette situation contraste fortement avec le profil observé au lac Tonga et pourrait s'expliquer par des conditions de croissance plus favorables dans le lac Oubeïra, une moindre pression de pêche, ou des variations dans la structure et la complexité de l'habitat. De plus, [Tahri \(2016\)](#) souligne une présence plus marquée des anguilles de grande taille pendant la période hivernale, suggérant une influence saisonnière sur la croissance et la répartition des classes de taille. Toujours selon ce même auteur, les anguilles de l'estuaire du Mafragh présentent des tailles comprises entre 240 et 740 mm, ce qui est en accord avec nos données, bien que dans notre étude, des tailles maximales légèrement plus élevées aient été observées, atteignant jusqu'à 860 mm. Les résultats de [Boudjadi \(2010\)](#) confirment également l'existence de différences significatives dans la structure des tailles entre les sites étudiés. Dans l'estuaire du Mafragh, les tailles moyennes à grandes prédominent ( $46,08 \pm 8,44$  cm), tandis que dans le lac Oubeïra, les anguilles de grande taille dominant ( $62,66 \pm 8,74$  cm). Ces observations sont en parfaite cohérence avec nos résultats, qui montrent que les anguilles de l'estuaire de la Mafragh atteignent des tailles supérieures à celles observées dans le lac Tonga. [Boudjadi \(2010\)](#) précise en outre que les performances de croissance des anguilles dans l'estuaire du Mafragh dépassent même celles rapportées dans certains sites européens. Dans une étude comparative portant sur 38 sites à travers l'aire de distribution de l'espèce, [Vollestad \(1992\)](#) a estimé que la taille moyenne des femelles argentées en Europe est de 632,3 mm, avec une plage allant de 450 à 863 mm. À l'échelle mondiale, les tendances sont similaires : chez



*Anguilla japonica*, la taille moyenne à maturité est estimée à  $614 \pm 40,5$  mm (Tzeng & Izuka, 2003) ; chez *Anguilla rostrata*, des tailles allant jusqu'à 853 mm ont été rapportées dans le fleuve Saint-Laurent (Verreault & Dumont, 2003) ; et chez *Anguilla australis*, les tailles maximales peuvent atteindre 945 mm en Tasmanie (Sloane, 1984). Pour *A. anguilla*, la taille maximale enregistrée à ce jour est de 1330 mm, mesurée chez une femelle capturée dans un lac hollandais (Dekker, 1998). Ces données illustrent une variabilité considérable des tailles selon les espèces et les régions, mettant en évidence le rôle déterminant des conditions environnementales sur les performances de croissance. Les paramètres de croissance calculés à l'aide du modèle de Von Bertalanffy font apparaître des différences significatives entre les deux sites. Au lac Tonga, la longueur asymptotique ( $L_{\infty}$ ) est estimée à 782,25 mm, pour un coefficient de croissance (K) de 0,54, indiquant une croissance modérée à rapide. À l'inverse, dans l'estuaire du Mafragh,  $L_{\infty}$  est plus élevé (897,75 mm), associé à un coefficient K plus important (1,50), ce qui suggère que les anguilles y atteignent plus rapidement leur taille optimale. Ces résultats traduisent un effet direct des conditions environnementales : milieux plus dynamiques, salinité variable, meilleure disponibilité des ressources alimentaires. Ces tendances sont cohérentes avec les observations de Ladjama (2016), qui note une croissance plus rapide en milieu estuarien comparée à celle enregistrée dans les plans d'eau intérieurs. Toutefois, les valeurs de K obtenues dans notre étude sont supérieures à celles rapportées dans la lagune El Mellah ( $K \approx 0,8$ ), ce qui pourrait refléter des particularités locales. Tahri (2016) souligne lui aussi l'influence marquée des conditions du milieu sur les paramètres de croissance, notamment dans le lac Oubeïra. De son côté, Boudjadi (2010) rapporte des résultats similaires et ajoute que dans l'estuaire du Mafragh, certaines anguilles dépassaient les tailles prévues par le modèle de Von Bertalanffy, ce qui témoigne de conditions particulièrement favorables à la croissance. La relation entre la longueur et le poids des anguilles capturées dans les deux milieux étudiés met en évidence une corrélation forte, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,9627 pour la population du lac Tonga et de 0,8688 pour celle de l'estuaire du Mafragh. Dans les deux cas, le coefficient d'allométrie (b) est supérieur à 3 ( $b = 3,22$  au lac Tonga et  $b = 3,275$  au Mafragh), indiquant une allométrie positive (ou majorante). Cette allométrie traduit une croissance pondérale plus rapide que la croissance en longueur, et donc un bon état général des populations. En d'autres termes, le poids des anguilles augmente plus que proportionnellement à leur taille. Au lac Tonga, cette allométrie positive ( $b = 3,22$ ) suggère une croissance corporelle favorable, avec une accumulation pondérale supérieure au cube de la longueur. Ce constat rejoint les observations de Tahri (2016) dans le lac Oubeïra, où un développement pondéral supérieur a également été enregistré. Dans l'estuaire du Mafragh, la



relation taille-poids montre une allométrie légèrement plus accentuée ( $b = 3,275$ ), confirmant une croissance en masse encore plus rapide que dans le lac Tonga. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle les conditions environnementales plus dynamiques du milieu estuarien – notamment une plus grande disponibilité en ressources alimentaires – favorisent une prise de poids plus importante. [Ladjama \(2016\)](#) a également rapporté des variations saisonnières de l'allométrie selon le cycle biologique des anguilles dans la lagune El Mellah. Une allométrie minorante ( $b = 2,75$ ) a été observée durant le cycle I, traduisant une croissance plus linéaire, tandis qu'une allométrie majorante ( $b = 3,13$ ) était enregistrée au cours du cycle II. Ces résultats soulignent l'influence potentielle de la saisonnalité sur les performances de croissance. [Boudjadi \(2010\)](#) a lui aussi observé des différences d'allométrie entre les milieux. Dans l'estuaire du Mafragh, il signale une allométrie positive ( $b = 3,11$ ) lors du premier cycle, alors qu'une allométrie isométrique ( $b = 3$ ) est notée durant le second cycle. Ces constats corroborent nos résultats et renforcent l'idée que les anguilles évoluant en milieu estuarien présentent une croissance pondérale plus accentuée que celles évoluant en eau douce, notamment dans le lac Tonga. Nos résultats concordent également avec ceux obtenus dans d'autres régions du bassin méditerranéen et d'Europe. Par exemple, [Vollestad \(1992\)](#) a rapporté une taille moyenne de 632 mm pour les anguilles argentées européennes, ce qui est proche des valeurs observées dans cette étude. De même, [Tzeng et Iizuka \(2003\)](#) ont montré que *Anguilla japonica* atteignait une taille moyenne de 614 mm à maturité. Ces comparaisons suggèrent que les dynamiques de croissance relevées dans le lac Tonga et l'estuaire du Mafragh sont représentatives de celles observées dans d'autres populations de la même espèce, voire d'autres espèces du genre *Anguilla*. Les travaux de [Meunier \(1994\)](#) ont par ailleurs montré que les performances de croissance des anguilles dans le Rhin étaient supérieures à celles enregistrées dans des rivières et lacs d'Europe du Nord (Norvège, Danemark, Pologne, Angleterre), mais inférieures à celles observées plus au sud, notamment au Portugal et en Espagne. Ce gradient latitudinal de croissance est confirmé par [Boudjadi \(2010\)](#), qui a comparé les performances des anguilles du Mafragh avec celles des estuaires de la Vilaine (France) et d'Espagne, montrant que les spécimens du Mafragh atteignent des tailles supérieures. Nos résultats s'inscrivent donc pleinement dans cette tendance. D'une manière plus générale, [Barcala et al. \(2022\)](#), [Boulenger et al. \(2015\)](#) et [Melia et al. \(2006\)](#) ont démontré que les anguilles évoluant dans des habitats d'eau douce et saumâtre en Europe méridionale affichaient de meilleures performances de croissance que celles observées à plus haute latitude ([Boulenger et al., 2015](#) ; [Piria et al., 2014](#)). Cela suggère que l'estuaire du Mafragh et le lac Tonga offrent des conditions écologiques favorables, comparables à celles des systèmes plus chauds et plus vastes du sud de l'Europe.



L'analyse des indices morphométriques liés à l'argenture des anguilles révèle des différences nettes entre les deux sites étudiés. Les valeurs de l'indice oculaire (OI) observées dans l'estuaire du Mafragh dépassent les 8 % pour la majorité des spécimens. Les valeurs les plus faibles ( $8,31 \% \pm 0,84$ ) ont été enregistrées chez les femelles en pré-migration (stade SFIII), tandis que les valeurs les plus élevées ont été notées aux stades IV et V ( $11,26 \pm 1,8 \%$  et  $11,04 \pm 1,61 \%$  respectivement). Chez le seul mâle capturé en phase de migration, l'indice oculaire était de 10,26 %, confirmant également un stade avancé d'argenture. Au lac Tonga, les OI les plus élevés (jusqu'à 12,99 %) ont été enregistrés chez les femelles au stade SFIII, tandis que les valeurs les plus faibles concernaient les anguilles en phase jaune (SI). Ces résultats sont en parfait accord avec les critères utilisés pour déterminer le stade d'argenture. Selon [Pankhurst \(1982\)](#), le seuil minimal d'OI à partir duquel les anguilles entament leur migration se situe aux alentours de 6,5 %. Toutefois, d'autres auteurs, notamment [Marchelidon et al. \(1999\)](#) et [Acou et al. \(2003\)](#), estiment ce seuil à 8 %, valeur qui semble mieux correspondre aux femelles. Dans ce sens, [Durif et al. \(2005\)](#) ont précisé que la valeur de 6,5 % est davantage adaptée aux mâles de petite taille ( $< 450$  mm), tandis que la valeur seuil pour les femelles est de 8 %. Nos observations sont donc conformes à ces recommandations. Par comparaison, dans le lac de Grevelingen (Pays-Bas), les anguilles jaunes présentent un OI moyen de  $7,14 \pm 1,31 \%$ , contre  $10,17 \pm 1,04 \%$  pour les argentées ([Van Ginneken et al., 2007](#)). Dans le delta du Göksu, les valeurs sont respectivement de  $6,07 \pm 1,54 \%$  pour les anguilles jaunes et  $8,42 \pm 1,80 \%$  pour les argentées ([Rad, 2013](#)). L'indice de la nageoire pectorale (FI) montre également une évolution marquée en lien avec la progression vers l'argenture. Dans le lac Tonga, les valeurs varient de 4,76 % chez les individus de la phase jaune à 4,97 % pour les pré-argentées, atteignant un maximum de 5,55 % au stade SMII. Dans l'estuaire du Mafragh, les valeurs de FI augmentent graduellement de 4,61 % (pré-migrants) jusqu'à 5,25 % (stade SFV), où le maximum est observé. Ces résultats sont partiellement en accord avec ceux de [Durif \(2003\)](#), qui propose une classification des stades d'argenture basée sur cet indice : un  $FI \leq 4,0 \%$  correspond aux individus jaunes, un FI compris entre 4,0 et 5,0 % indique un stade de transition, et un  $FI > 5,0 \%$  est caractéristique des individus argentés. Dans notre étude, les valeurs de FI chez les anguilles argentées dépassent ce seuil dans les deux sites, ce qui confirme leur appartenance à la phase migratoire selon les critères de [Durif et al. \(2005\)](#). À titre de comparaison, [Tahri & Bensouilah \(2016\)](#) ont observé des valeurs de FI toujours supérieures à 5,5 %, quelle que soit la phase de développement des anguilles capturées dans le lac Oubeira. [Rad et al. \(2013\)](#) ont quant à eux rapporté un FI moyen de  $5,02 \pm 0,90 \%$  dans ce même lac, sans différence significative avec les femelles jaunes ( $4,91 \pm 0,34 \%$ ), ce qu'ils expliquent par



d'éventuelles erreurs de mesure ou un chevauchement morphologique entre les phases. Dans l'ensemble, comme l'OI, le FI reste un indicateur fiable de la progression vers la phase migratoire, bien que son interprétation puisse être influencée par des facteurs individuels et environnementaux. D'après les critères morphométriques définis par [Durif \(2003\)](#), le seul mâle capturé dans l'estuaire du Mafragh présente une hypertrophie oculaire ( $OI > 10\%$ ) et une nageoire pectorale élargie ( $FI > 5\%$ ), ce qui permet de conclure qu'il avait achevé son argenture et était prêt à entamer la migration océanique. Le GSI (indice gonado-somatique) est un autre indicateur de maturation sexuelle. Dans notre étude, les valeurs moyennes du GSI ont augmenté progressivement de  $0,51\%$  (SFIII) à  $0,93\%$  (SFIV), atteignant  $0,94\%$  au stade SFV dans l'estuaire du Mafragh. Dans le lac Tonga, le GSI évolue plus modérément, passant de  $0,35\%$  (SFIII) à  $0,68\%$  (SFV). Ces valeurs restent globalement inférieures au seuil de  $1\%$  défini pour les femelles argentées selon [Durif et al. \(2009\)](#) et [Palstra et al. \(2010\)](#). D'un point de vue comparatif, les valeurs rapportées en Europe varient : en France, [Durif et al. \(2009\)](#) ont observé un GSI moyen de  $0,54\% (\pm 0,19)$  chez les résidentes (SFII) et de  $1,71\% (\pm 0,31)$  chez les migrantes (SFV). Aux Pays-Bas, [Van Ginneken et al. \(2007\)](#) ont mesuré un GSI moyen de  $1,40 \pm 0,28\%$  chez les anguilles argentées du lac Grevelingen. En Turquie, dans le delta du Göksu, [Rad et al. \(2013\)](#) ont rapporté des GSI moyens de  $0,59\%$  pour les anguilles jaunes et de  $1,78\%$  pour les argentées. De leur côté, [Acou et al. \(2003\)](#) ont indiqué que  $98\%$  des anguilles argentées femelles capturées dans le bassin de la Loire avaient un GSI supérieur à  $1\%$ , avec une moyenne de  $1,68 \pm 0,39\%$ . En comparaison, les valeurs obtenues dans notre étude, bien qu'en augmentation vers le stade SFV, demeurent légèrement inférieures aux seuils généralement acceptés, suggérant que les individus capturés sont en phase précoce de maturation. Ces résultats soulignent un stade physiologique encore incomplet chez une partie des individus en voie d'argenture. L'analyse de l'indice hépatosomatique (HSI), utilisé pour évaluer les réserves énergétiques stockées dans le foie, a révélé une tendance à la baisse chez les anguilles en progression vers la phase migratoire. Dans l'estuaire du Mafragh, une légère diminution de la valeur moyenne du HSI est observée entre les stades SFIII ( $1,52 \pm 0,34\%$ ) et SFV ( $1,53 \pm 0,34\%$ ). Cette tendance à la réduction du HSI s'observe également dans les deux milieux au stade IV ( $1,29 \pm 0,31\%$  au Mafragh) et au stade V ( $1,04 \pm 0,08\%$  au lac Tonga), ce qui s'explique par la cessation de l'alimentation chez les individus en phase de migration. Ces résultats sont cohérents avec les observations de [Durif et al. \(2003\)](#), qui ont noté une diminution du HSI entre le stade jaune ( $1,72 \pm 0,59\%$ ) et le stade argenté ( $1,24 \pm 0,30\%$ ), traduisant la mobilisation des réserves hépatiques en prévision de la migration. De même, dans le lac de Grevelingen, [Van Ginneken et al. \(2007\)](#) ont rapporté des valeurs moyennes proches ( $1,34\%$



chez les argentées, 1,35 % chez les jaunes). Dans le lac Oubeïra, [Tahri & Bensouilah \(2016\)](#) ont également relevé une réduction progressive du HSI de 1,36 % à 1,16 % entre les deux stades. Enfin, dans le bassin de la Loire, [Acou et al. \(2003\)](#) ont observé que 94 % des femelles présentaient un HSI supérieur à 1 %, avec une moyenne de  $1,34 \pm 0,25$  %, variant significativement selon la période de l'année. Par ailleurs, les valeurs de l'indice des glandes intestinales (GIs), utilisé comme indicateur du métabolisme énergétique et du stress physiologique, montrent une nette diminution au cours du processus d'argenture. Chez les individus de l'estuaire du Mafragh, le GIs diminue de 3,22 % (stade SFIII) à 1,66 % (stade SFV), tandis qu'au lac Tonga, il passe de 1,80 % à 1,11 %. Cette diminution progressive est liée à l'interruption de l'alimentation durant la préparation à la migration océanique. Toutefois, cette baisse est moins marquée chez les individus du stade V, qui conservent une valeur de GIs modérée, en accord avec les données rapportées par [Durif et al. \(2005\)](#) pour les femelles argentées au stade IV. Les résultats obtenus suggèrent que les femelles de l'estuaire du Mafragh, âgées d'environ cinq ans, atteignent un état physiologique compatible avec le début de la migration vers l'océan, ce qui a également été observé par [Tahri & Bensouilah \(2016\)](#) dans le lac Oubeïra. Au-delà des considérations morphométriques et physiologiques, l'étude met en évidence des éléments importants concernant les impacts anthropiques sur la structure des populations anguilliformes. L'indice de performance de croissance ( $\Phi'$ ), calculé pour chaque site, est plus élevé dans l'estuaire du Mafragh ( $\Phi' = 6,082$ ) que dans le lac Tonga ( $\Phi' = 5,519$ ), ce qui traduit des conditions de croissance plus favorables dans le milieu estuarien. Cependant, cette meilleure performance pourrait également être influencée par une pression de pêche plus intense, susceptible de sélectionner les individus les plus rapides en croissance. Les aménagements hydrauliques, notamment les barrages et autres obstacles à la migration, constituent un autre facteur critique affectant la dynamique des populations. Ces structures peuvent perturber les migrations catadromes naturelles des anguilles, altérant ainsi leur cycle de vie. [Tahri \(2016\)](#) et [Ladjama \(2016\)](#) ont déjà mis en évidence les effets négatifs de ces infrastructures sur la migration des anguilles argentées. Nos résultats s'inscrivent pleinement dans cette problématique. Du côté tunisien, [Derouiche \(2016\)](#) a également rapporté des différences significatives dans la structure démographique et la croissance des anguilles selon les lagunes étudiées. Dans le lac nord de Tunis et le lac Ichkeul, les populations sont dominées par des femelles, tandis qu'à Ghar El Melh, la répartition entre les sexes est plus équilibrée. L'auteur explique ces variations par des différences dans la densité de population, la qualité du milieu, et la disponibilité des ressources alimentaires. Elle note également que les femelles sont généralement plus âgées, plus grandes et plus lourdes que les mâles, ce qui correspond



également à nos observations dans le Mafragh. Les facteurs abiotiques influençant la structure de la population et la croissance des anguilles sont nombreux. Parmi eux, la température joue un rôle prépondérant : des températures plus élevées, typiques du milieu estuarien, favorisent un métabolisme plus actif et une croissance accélérée. À l'estuaire du Mafragh, les variations thermiques et de salinité créent un environnement écologiquement dynamique, favorable à l'accumulation de biomasse. À l'inverse, le lac Tonga, plus stable sur le plan environnemental et caractérisé par des eaux douces, offre un cadre propice à une croissance plus régulière, mais moins rapide. La salinité influence elle aussi la distribution et la croissance. Les anguilles exposées à des milieux saumâtres, comme le Mafragh, tendent à atteindre des tailles plus importantes que celles évoluant en eau douce. Ce constat rejoint les hypothèses formulées dès [Bertin \(1951\)](#), selon lesquelles les mâles sont plus fréquemment rencontrés en eaux saumâtres, tandis que les femelles domineraient en eaux douces. Cette hypothèse a toutefois été nuancée par [Sinha & Jones \(1966\)](#), qui ont observé la coexistence des deux sexes quel que soit le type de milieu.

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude mettent en lumière l'importance déterminante des conditions environnementales dans la structuration des populations d'anguilles européennes. Le lac Tonga, par son milieu lentique, doux et relativement stable, semble favoriser le maintien d'une population à croissance modérée, dominée par des individus de taille intermédiaire. En revanche, l'estuaire du Mafragh, caractérisé par une plus grande variabilité hydrologique, une salinité plus élevée et une ressource alimentaire plus abondante, favorise une croissance plus rapide, des performances physiologiques accrues, et des tailles corporelles supérieures. Ces constats soulignent la nécessité de préserver la diversité des habitats, afin de garantir le maintien de populations saines, fonctionnelles et résilientes, tout en tenant compte des menaces anthropiques croissantes qui pèsent sur cette espèce en déclin à l'échelle mondiale.



**Axe II : Analyse du régime alimentaire de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*)**

L'analyse du régime alimentaire des différentes fractions de la population d'anguilles européennes étudiées dans cette recherche repose sur plusieurs indicateurs, dont principalement l'évaluation de l'état nutritionnel à travers le coefficient de vacuité (CV %), et l'analyse des proies présentes dans le tube digestif, en tenant compte de leur fréquence d'apparition (F%). Le coefficient de vacuité, qui mesure la proportion d'individus ayant un tube digestif vide, a été utilisé pour comparer l'activité trophique entre les deux milieux : le lac Tonga et l'estuaire du Mafragh. Les résultats obtenus indiquent un CV moyen de 41,11 % pour le lac Tonga contre 19,59 % pour l'estuaire du Mafragh, ce qui témoigne d'une activité alimentaire plus soutenue dans ce dernier. En effet, près de la moitié des anguilles capturées dans le lac Tonga présentaient un appareil digestif vide. Ces résultats contrastent fortement avec ceux rapportés par [Ladjama \(2016\)](#), qui avait observé un CV moyen de 60 % dans le lac Tonga et de 74 % dans la lagune El Mellah, ainsi qu'avec ceux de [Djebbari \(2012\)](#), qui rapportait respectivement 65 % et 79 % pour les mêmes sites. L'évolution mensuelle du CV% dans le lac Tonga montre une augmentation progressive à partir de janvier, culminant en mai avec une valeur maximale de 86,67 %, suivie d'une baisse continue jusqu'en novembre (13,33 %). Cette variation saisonnière, comparable à celle décrite par [Djebbari \(2012\)](#) et [Tahri \(2016\)](#), semble fortement influencée par la température ambiante, qui affecte les besoins énergétiques des anguilles. Selon [Vøllestad et al. \(1988\)](#), la température est un facteur déterminant de l'activité trophique chez *A. anguilla*. Lorsque les températures sont extrêmes – trop froides ou trop chaudes – l'activité métabolique diminue, réduisant les besoins en nourriture. Cette tendance est également perceptible dans l'estuaire du Mafragh, où le CV% atteint 80 % en été et diminue à 40 % en hiver, comme le confirme [Tahri \(2009\)](#). Ce ralentissement de l'activité alimentaire pendant les extrêmes saisonniers s'explique par une réduction du catabolisme, phénomène bien documenté chez l'anguille jaune et d'autres espèces ectothermes. Ainsi, la recherche active de nourriture, habituellement à l'origine de nombreux déplacements, se trouve fortement limitée durant ces périodes. Dans les zones tempérées, [Tesch \(1993\)](#) souligne que les anguilles tendent à suspendre complètement leur activité en hiver. [Bruun \(1963\)](#) estime que l'alimentation ne débute qu'à partir de 10 °C, tandis que [Nyman \(1972\)](#) indique une activité alimentaire optimale entre 13 et 17 °C, mais une interruption quasi complète sous 8 °C, moment où les anguilles s'enfouissent dans le substrat pour rester inactives. D'autres études ([Liew, 1982 ; Eckersley, 1982 ; Moriarty, 1987 ; Desrochers, 1998](#)) montrent que l'intensité de la migration des anguilles jaunes augmente significativement lorsque la température de l'eau dépasse 20 °C. Les travaux de [Walsh et al. \(1983\)](#) sur *A. rostrata* ont confirmé expérimentalement qu'entre 10 °C et 20 °C, les anguilles



s'alimentent activement. En revanche, à des températures inférieures à 5 °C, l'alimentation cesse après cinq semaines. L'étude du CV% selon les classes de taille révèle également des tendances intéressantes. Au lac Tonga, les anguilles de taille moyenne (45–55 cm) présentent un CV% plus faible (34,32 %) comparé aux petites (25–35 cm) et grandes (65–75 cm) anguilles, qui ont des valeurs plus élevées. Ce profil trophique est cohérent avec les résultats de [Djebbari \(2012\)](#), qui avait également observé une baisse de l'activité alimentaire chez les individus de taille moyenne. Dans l'estuaire du Mafragh, la situation est inversée : les anguilles de taille moyenne (60–70 cm) présentent le CV% le plus élevé (34,48 %), ce qui pourrait indiquer une différence dans la répartition ou l'accessibilité des proies selon la taille, ou une adaptation locale du comportement alimentaire. L'analyse des classes d'âge révèle des profils similaires : au lac Tonga, les individus les plus âgés (classe [7 – 8,5[ans) présentent un CV% de 0 %, indiquant une baisse de l'activité alimentaire possiblement liée à une diminution du métabolisme ou à une stratégie d'économie d'énergie en fin de cycle de vie. Ces observations sont en accord avec [Vøllestad et al. \(1988\)](#). Fait remarquable, cette tendance est également visible dans l'estuaire du Mafragh, où le CV% est également nul pour les anguilles les plus âgées, mais aussi chez les plus jeunes (classe [1 – 2,5[ans), ce qui pourrait correspondre à une phase d'adaptation alimentaire. L'étude de la fréquence d'apparition des proies et de la composition du régime alimentaire confirme des variations significatives entre les deux sites et en fonction de la taille des anguilles. Dans le lac Tonga, les jeunes anguilles (classe [1–2,5[ans) consomment majoritairement des poissons (75 %), mais cette tendance diminue avec l'âge au profit des insectes (jusqu'à 100 % dans la classe [7–8,5[) et des crustacés (jusqu'à 20 % dans la classe [5,5–7[). À l'inverse, dans l'estuaire du Mafragh, les jeunes se nourrissent exclusivement de crustacés, puis diversifient leur alimentation en incluant poissons et insectes à mesure qu'ils vieillissent, atteignant à l'âge adulte un régime mixte équilibré. La taille influence également les préférences alimentaires. Dans le lac Tonga, les petites anguilles (25–35 cm) consomment essentiellement poissons et insectes, les moyennes (45–55 cm) se nourrissent de poissons et de végétaux, tandis que les grandes (65–75 cm) se spécialisent dans les crustacés. Cette dynamique est similaire dans l'estuaire du Mafragh, où les petites tailles (40–50 cm) consomment insectes, et les grandes (60–70 cm) optent pour un régime mixte. Ces résultats corroborent ceux de [Djebbari \(2012\)](#), qui a observé une augmentation de la consommation de poissons et de crustacés avec la taille des anguilles, tant dans le lac Tonga que dans la lagune El Mellah. [Ladjama \(2016\)](#) a également noté qu'en milieu saumâtre, l'augmentation de taille s'accompagne d'un régime enrichi en poissons et crustacés, tandis qu'en eau douce, la consommation de plantes, d'insectes et de crustacés tend à diminuer au profit des poissons. La disponibilité des proies et les conditions



environnementales jouent un rôle clé dans la composition du régime alimentaire. Ainsi, la forte proportion de poissons dans le régime des anguilles du lac Tonga pourrait être attribuée à une abondance de proies piscivores, alors que la prédominance des insectes et crustacés dans le Mafragh reflète une accessibilité accrue de ces ressources. [Boudjadi \(2010\)](#) a rapporté que les anguilles du Mafragh consommaient majoritairement des poissons (46 %), suivis d'aliments digérés (37 %), avec seulement 17 % d'insectes et de crustacés. [Tahri \(2009\)](#) a observé une hiérarchisation similaire : poissons (38,59 %), puis crustacés et insectes. Dans le lac Oubeïra, [Tahri \(2016\)](#) note également une préférence marquée pour les proies animales. Le régime alimentaire omnivore des anguilles jaunes est influencé par divers facteurs : taille corporelle, largeur de mâchoire, saison, et disponibilité des proies. Ces variations rendent difficile toute généralisation. De plus, les conditions expérimentales peuvent biaiser l'analyse : les anguilles peuvent consommer des proies capturées dans les nasses ou les filets avant leur dissection ([Tahri, 2016](#)), ce qui altère la composition réelle du bol alimentaire. Les études de synthèse sur l'alimentation de l'anguille (e.g. [Fahay, 1978](#) ; [Facey & Van Den Avyle, 1987](#) ; [Lary & Busch, 1997](#)) ont montré que son régime est surtout constitué d'invertébrés benthiques et de poissons, et que l'alimentation est principalement nocturne. Les proies peuvent être chassées, capturées piégées, ou récupérées comme carcasses ([Godfrey, 1951](#) ; [O'Connor, 1971](#) ; [Caron et al., 1986](#)). Des débris végétaux (2–5 % d'occurrence) et inorganiques (5–18 %) sont également présents dans les estomacs ([Wenner & Musick, 1975](#) ; [McCord, 1977](#) ; [Facey & LaBar, 1981](#)), suggérant une alimentation benthique, corroborée par des observations directes ([Perlmutter, 1951](#) ; [Jenkins et Jenkins, 1980](#) ; [Helfman, 1986, 1995](#)). Une relation entre la taille des proies et celle de l'individu a été décrite chez les anguilles comme chez d'autres prédateurs ([Ogden, 1970](#) ; [Facey & LaBar, 1981](#) ; [Sinha & Jones, 1967b](#) ; [Lookabaugh & Angermeier, 1992](#)). Toutefois, la taille des poissons consommés n'est pas toujours liée à la taille corporelle globale, mais plutôt à la largeur de la bouche ([Tesch, 1991](#)). [Lammens & Visser \(1989\)](#) ont montré une flexibilité morphologique chez certaines populations, distinguant des individus à tête large, piscivores, et d'autres, insectivores, à tête plus étroite. Ces différences morphologiques semblent davantage liées aux conditions écologiques locales qu'au sexe de l'individu.



**Axe 3 : Biodiversité de la faune parasitaire de l'anguille européenne**

L'étude de la faune parasitaire chez l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) dans deux écosystèmes contrastés : le lac Tonga (milieu dulcicole) et l'estuaire du Mafragh (milieu saumâtre) a permis de recenser une diversité relativement riche de parasites. Au total, huit espèces parasitaires ont été identifiées, réparties en deux ectoparasites (*Pseudodactylogyrus sp.*, *Ergasilus sp.*) et six endoparasites (dont trois nématodes, deux cestodes et un acanthocéphale). Cette diversité est en adéquation avec celles relevées dans d'autres hydrosystèmes méditerranéens, bien que l'on observe des variations notables selon les conditions écologiques locales, notamment la salinité, la température, et la structure trophique (Koie, 1988 ; Kennedy, 1997). La salinité semble constituer un facteur structurant majeur dans la répartition des parasites. Nos résultats révèlent que les milieux à salinité réduite, tel que le lac Tonga, présentent une diversité parasitaire moins importante que les milieux saumâtres comme le Mafragh. Cette observation s'oppose aux conclusions de Koie (1988), Kennedy (1997) et Derouiche (2016) selon lesquelles la diversité parasitaire diminue avec l'augmentation de la salinité. Les différences observées entre les deux sites peuvent être liées à plusieurs facteurs ; tel que la qualité de l'eau, sachant qu'une pollution ou une eutrophisation accrue peut influencer la diversité des hôtes intermédiaires et donc des parasites, ce qui pourrait expliquer la diversité parasitaire et la prévalence importante au niveau de l'estuaire de Mafragh transportant d'importantes quantités de sédiments, de matières en suspension, de sels nutritifs et divers contaminants terrestres (Ounissi, 2007). Parmi les espèces recensées, *Pseudodactylogyrus sp.*, un parasite branchial d'origine asiatique introduit en Europe dans les années 1970, est apparu comme particulièrement fréquent dans les deux stations. Les prévalences observées dans notre étude sont élevées, atteignant 66,11 % au lac Tonga et 69,07 % à l'estuaire du Mafragh, ce qui confirme son installation durable dans les populations naturelles. Ce parasite est bien connu pour provoquer des altérations des tissus branchiaux, une gêne respiratoire, et une sensibilité accrue au stress environnemental (Buchmann, 1993 ; Fazio, 2007 ; Amilhat, 2007). Cette espèce peut nuire à la respiration des anguilles, entraînant un stress physiologique et une diminution de leur croissance (Buchmann & Lindenstrøm, 2002). Suivi par *Anguillicoloides crassus* (endoparasite de la vessie natatoire) nématode introduit en Europe à partir des années 1980 (Kirk, 2003), est beaucoup plus fréquent à Mafragh (64,95 %) qu'à Tonga (18,33 %), ce parasite est particulièrement préoccupant, car il s'est avéré hautement pathogène pour les anguilles et son rôle dans la diminution des stocks d'anguilles car il affecte la vessie natatoire, ce qui peut réduire les capacités de nage et de migration des anguilles (Szekely et al., 2008), (Lefebvre et al., 2013). La dominance et la prévalence importante d'*Anguillicoloides crassus* a été soulignée



dans plusieurs habitats d'anguilles, notamment au Maroc, au niveau de l'estuaire du Sebou (El-Hilali et al., 2004), en Algérie au niveau de l'estuaire de Mafragh (Boudjadi et al., 2009), en revanche une infestation moindre a été rencontrées dans les plans d'eau douces (Djebbari et al., 2009). Tandis que, Ladjama (2016), rapporte une prévalence de 40 % dans le lac Tonga contre seulement 5 à 6 % dans la lagune El Mellah. À Mafragh, bien que la prévalence reste importante, elle demeure inférieure à celle des zones plus stables sur le plan hydrologique. Cette différence pourrait s'expliquer par la variation des paramètres environnementaux (salinité, température, courant), déjà évoqués par Gargouri Ben Abdallah & Maamouri (2006) dans leurs travaux en Tunisie. Les conséquences écologiques sont majeures : les études du programme EELREP (2005) ont montré que les anguilles fortement infestées ne parviennent pas à maintenir une nage active de plus de deux mois en tunnel, rendant improbable leur arrivée jusqu'à la mer des Sargasses pour y effectuer leur ponte. Ainsi, les parasites (particulièrement *A. crassus*) participent indirectement au déclin démographique des anguilles, en compromettant leur succès reproductif (Lefebvre et al., 2007 ; Jacoby et Gollock, 2014). Ensuite viennent les parasites des Intestins, soit *Bothriocephalus claviceps* et Larve de *Bothriocephalus sp* qui sont retrouvés dans les deux sites avec des prévalences similaires de 27,22 % au lac Tonga et 30,93 % à l'estuaire du Mafragh, surtout chez les anguilles de grande taille. Ces résultats rejoignent ceux de Dupont et Gabrion (1987), qui ont souligné le lien entre la taille corporelle et l'accès à des proies infectantes plus diversifiées. Ce parasite est également dominant dans les travaux de Tahri (2016) et Ladjama (2016), notamment dans les eaux douces où il représente jusqu'à 36 à 37 % des effectifs récoltés. Cette tendance a été observée dans plusieurs zones du bassin méditerranéen, y compris en Tunisie (Gargouri Ben Abdallah et Maamouri, 2006 ; prévalence de 20 %) et en Italie, bien que des prévalences plus faibles aient été signalées dans certaines lagunes italiennes (9,1 %, Di Cave et al., 2001). Les larves de nématodes sont rares dans les deux sites étudiés, avec une prévalence inférieure à 10 %. En dernière position figure le parasite branchial *Ergasilus sp.*, qui présente la plus faible prévalence au niveau du lac Tonga. Quant à *Echinorhynchus sp* et *Eustrongylides sp.*, parasites respectivement localisés dans l'intestin et la cavité abdominale, ils n'ont été détectés qu'au niveau de l'estuaire de Mafragh. Leur prévalence y demeure faible comparativement aux autres parasites identifiés dans ce même site.

La présence du nématode *Eustrongylides sp.*, parasite à potentiel zoonotique, connu pour sa localisation préférentielle dans la cavité abdominale des poissons, a également été confirmée au cours de cette étude. Bien que sa prévalence reste relativement faible, sa détection revêt une importance sanitaire notable, notamment en raison de son impact visuel sur les produits halieutiques et de la réglementation liée aux parasites visibles. Ce parasite avait déjà été signalé



en Algérie par [Tahri \(2016\)](#) dans le lac Oubeira, ce qui confirme sa persistance dans certains écosystèmes dulçaquicoles du nord-est algérien. La détection exclusive de *Eustrongylides* sp dans l'estuaire de Mafragh pourrait être liée à des conditions écologiques propices à la complétion de son cycle de vie, notamment la présence d'oligochètes benthiques et d'oiseaux piscivores. Par ailleurs, ce nématode, étudié par [Franceschini et al. \(2022\)](#) en Italie, peut provoquer des granulomes sévères et des lésions musculaires chez les poissons hôtes, affectant ainsi leur qualité physiologique et commerciale. Sa présence, même à de faibles niveaux, reflète probablement un écosystème riche en maillons trophiques intermédiaires, notamment en invertébrés aquatiques porteurs du parasite, tels que les vers oligochètes. Ces résultats confirment les observations de [Castiglione et al. \(2023\)](#), qui soulignent la sensibilité des zones eutrophes à l'installation durable de ce parasite, en raison de leur forte densité en hôtes intermédiaires et de la présence croissante d'oiseaux piscivores. L'analyse des indices épidémiologiques (prévalence, abondance, intensité) met en évidence des différences significatives entre les deux sites, ainsi qu'en fonction des classes de taille et d'âge des anguilles. Contrairement à la richesse spécifique, c'est l'estuaire du Mafragh qui présente les prévalences parasitaires les plus élevées. Cette situation pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs : la qualité de l'eau, la disponibilité des hôtes intermédiaires, ou encore l'influence de la pollution organique qui favorise certains cycles parasitaires ([Boudjadi, 2010](#) ; [Schabuss et al., 2005](#)). L'étude de l'effet de la taille corporelle a montré que les anguilles de grande taille (60–70 cm) présentent une intensité et une prévalence parasitaires plus élevées, ce qui corrobore les observations de [Tahri \(2009\)](#) et [Lefebvre et al. \(2002a\)](#). L'explication probable est une accumulation progressive des parasites au fil du temps, les individus plus âgés ayant été exposés plus longtemps aux formes infestantes. L'impact sanitaire des parasites sur les anguilles est particulièrement préoccupant dans le cas de *A. crassus*, dont la présence dans la vessie nataoire compromet la capacité de nage, la flottabilité, et in fine, la migration vers les aires de reproduction ([Kennedy et Fitch, 1990](#)). Selon [Palstra et al. \(2007\)](#), les anguilles fortement infestées présentent une endurance réduite et un taux élevé de mortalité lors des phases de nage forcée. Dans notre étude, les valeurs d'intensité moyenne étaient de 10,39 parasites/anguille au lac Tonga et 6,98 au Mafragh, ce qui confirme l'importance parasitaire de cette espèce, au même titre que dans les études de [Tahri \(2016\)](#) (8 parasites/anguille en moyenne au lac Oubeïra) et [Tahri \(2009\)](#) (4 parasites/anguille au Mafragh). Les observations régionales sont comparables aux inventaires parasitologiques réalisés dans les lagunes françaises ([Fazio et al., 2005](#)), italiennes ([Kennedy et al., 1997](#) ; [Di Cave et al., 2001](#)) ou espagnoles ([Maillo et al., 2000](#)), où la diversité est souvent modérée mais marquée par la dominance d'une ou deux espèces. Dans



toutes ces études, *A. crassus* apparaît comme l'un des principaux parasites, ce qui confirme son statut invasif et adaptatif. Par ailleurs, notre étude propose une approche plus intégrative, en analysant l'influence des stades de développement (stades d'argente) et du site sur l'abondance parasitaire, ce qui permet une lecture épidémiologique plus fine, l'analyse statistique réalisée à l'aide d'un modèle binomial négatif à inflation de zéro a permis de préciser les facteurs influençant l'abondance parasitaire chez *Anguilla anguilla*. Deux paramètres ressortent significativement : le stade de développement et le site de capture. En particulier, les anguilles au stade FIII (femelle résidente) présentent une abondance significativement plus faible que celles de la classe de référence MII (mâle pré migrant) ( $\beta = -0,8$  ; IC 95 % : -1,4 à -0,1 ;  $p = 0,022$ ). De plus, le site du lac Tonga est associé à une charge parasitaire significativement inférieure à celle du Mafragh ( $\beta = -1,8$  ; IC 95 % : -3,0 à -0,5 ;  $p = 0,006$ ). Ces résultats corroborent les analyses descriptives et renforcent l'idée que la salinité et la structuration du milieu influencent la dynamique parasitaire. En revanche, des variables telles que le poids total, la longueur ou encore l'âge des anguilles ne montrent pas d'effet significatif dans notre modèle, ce qui suggère que, dans les conditions de cette étude, le stade de développement et le site sont des déterminants plus pertinents de l'abondance parasitaire que les caractéristiques morphologiques.

L'analyse post-hoc par paires a montré que les anguilles au stade FV (femelle migrante) hébergent une charge parasitaire significativement plus élevée que celles aux stades FII (femelle résidente) ( $p < 0,0001$ ), FIII (femelle résidente en phase de maturation des ovaires) ( $p = 0,0349$ ) et I ( $p < 0,0001$ ). Cela suggère que les anguilles en fin de développement sont plus exposées ou plus vulnérables aux infestations parasitaires, probablement en lien avec des modifications comportementales, immunitaires ou trophiques. Aucune différence significative n'a été relevée entre les autres stades (FII, FIII, FIV, I et MII), suggérant une certaine stabilité parasitaire dans ces groupes. Notre approche statistique offre donc un éclairage complémentaire, en intégrant des paramètres biologiques individuels pour mieux comprendre les mécanismes de l'infestation.

En conclusion, les résultats de cette étude s'inscrivent globalement dans les tendances rapportées en Méditerranée occidentale. La dominance de *Pseudodactylogyrus sp* et d'*A. crassus*, et l'effet de la salinité sur la richesse parasitaire sont des constantes retrouvées aussi bien en Algérie qu'en Tunisie. L'analyse comparée permet de mettre en évidence non seulement les spécificités écologiques propres à chaque site, mais aussi les mécanismes d'adaptation parasitaire liés à l'hôte et à l'environnement. Ces données confirment l'intérêt du suivi parasitologique comme indicateur de la santé des milieux aquatiques et de l'impact anthropique sur les systèmes lagunaires et lacustres.



**Partie III : Contamination et bioaccumulation métallique chez l'anguille (*A. anguilla*)**

L'objectif de cette étude était d'évaluer la contamination métallique chez l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) dans deux écosystèmes distincts en Algérie, le lac Tonga (eau douce) et l'estuaire du Mafragh (eau saumâtre), en mettant l'accent sur l'accumulation de métaux lourds dans les tissus et le foie. La bioaccumulation de ces contaminants peut entraîner des conséquences physiologiques et écologiques majeures sur cette espèce migratrice et surtout en danger critique d'extinction. Nos résultats permettent d'identifier les différences de contamination entre ces deux sites et de comparer nos données à celles obtenues dans d'autres régions, notamment en Afrique du Nord et en Europe. Nos résultats montrent une bioaccumulation marquée de plomb (Pb) et de cadmium (Cd) dans le foie des anguilles, confirmant leur nature de métaux non essentiels fortement toxiques. À l'estuaire de la Mafragh, les concentrations en Pb atteignent 5,11 µg/g dans le foie contre 1,79 µg/g au lac Tonga. Dans le muscle, elles sont moindres : 2,45 µg/g à Mafragh et 1,00 µg/g à Tonga. Concernant le Cd, on observe à la Mafragh une concentration hépatique de 0,54 µg/g, comparée à 0,25 µg/g à Tonga. Les niveaux musculaires sont plus faibles : 0,05 µg/g à la Mafragh, mais atteignent 0,32 µg/g à Tonga, surtout chez les individus les plus parasités. Ces résultats mettent en évidence le rôle central du foie dans la détoxification, ces deux métaux étant majoritairement stockés dans cet organe. [Bendjama \(2007\)](#), qui constitue à ce jour la seule étude réalisée sur la contamination métallique chez l'anguille européenne en Algérie, et ce précisément au niveau du lac Tonga. Dans son travail, elle rapporte des concentrations relativement faibles dans le foie, avec des teneurs en plomb variant entre 0,38 et 0,41 mg/kg de poids sec, en cadmium entre 0,013 et 0,014 mg/kg, en fer entre 39,58 et 43,23 mg/kg, et en zinc entre 41,09 et 43,55 mg/kg. Ces valeurs, bien inférieures à celles relevées dans notre étude, pourraient s'expliquer par des différences temporelles dans la pression de pollution, ou encore par des méthodes d'analyse et de sensibilité différentes. Elles confirment néanmoins le profil d'accumulation hépatique des métaux chez cette espèce dans ce même site. Dans un contexte géographiquement proche, [Derouiche \(2016\)](#) a également observé dans les lagunes tunisiennes des concentrations significatives en Pb et Cd, notamment dans le foie, et a souligné le lien entre pollution anthropique et accumulation hépatique. Ce qui est en accord avec les travaux de [Wariaghli \(2013\)](#) au Maroc et de [Yildiz et al. \(2010\)](#) en Turquie, où les concentrations de Pb étaient significativement plus élevées dans les organes métaboliques. Les résultats obtenus montrent clairement une accumulation plus importante des métaux dans le foie que dans le muscle, en particulier pour le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et le fer (Fe). Ces résultats corroborent les observations de plusieurs études



antérieures (Barbier et al., 2005 ; Durrieu et al., 2005 ; Pierron et al., 2008a), qui montrent que le foie, en raison de son rôle clé dans le métabolisme et la détoxification, est le principal site de stockage des éléments métalliques. Le foie étant un organe de détoxification majeur, il concentre plus facilement les contaminants métalliques, notamment via les métallothionéines. Ainsi nos résultats sont en concordance avec d'autres études précédentes qui montrent que la bioaccumulation sélective des contaminants dans les organes métaboliques comme le foie, tandis que les muscles sont moins impactés mais restent une voie potentielle d'exposition pour les consommateurs (Geeraerts & Belpaire, 2010; Bejaoui et Hamza-Chaffai, 2012 ; Gharbi et al., 2019 ; Rahhou et al., 2011). Aussi les conclusions de Derouiche (2016) en Tunisie, qui note une concentration hépatique nettement supérieure pour le Pb, Cd, et Cu chez *A. anguilla* dans les lagunes de Bizerte. Cette tendance est également confirmée par Kljaković-Gašpić et al. (2023), qui ont étudié l'anguille jaune dans la rivière Raša en Croatie et rapportent une accumulation dominante dans le foie pour Cd, Pb, Zn, en lien avec la pollution historique des sédiments. De manière complémentaire, Demirak et al. (2022), en comparant les anguilles des lacs de Turquie et d'Estonie, soulignent aussi l'importance du foie comme tissu cible pour les métaux non essentiels. Il est important de noter que certains travaux, comme ceux de Has-Shön et al. (2008) en Bosnie-Herzégovine, ont montré une accumulation de Pb également dans les branchies, en raison de l'absorption directe par l'eau. Aussi, Kljaković-Gašpić et al. (2023) en Croatie, et Demirak et al. (2022) en Turquie et Estonie, confirment ce profil avec une accumulation prédominante dans le foie des anguilles exposées à des bassins miniers ou agricoles. Du point de vue physiologique, le foie constitue un organe- clé dans la séquestration du Cd, qui est souvent capté via les branchies avant d'être stocké et neutralisé. Ce mécanisme a été démontré par Pierron et al. (2008), qui notent aussi que la présence de parasites peut aggraver l'accumulation par stress métabolique. En termes de santé publique, les concentrations observées dépassent localement les limites recommandées pour la consommation humaine (0,3 µg/g pour le Pb et 0,5 µg/g pour le Cd dans les tissus comestibles). Ce constat est similaire à celui établi par Luczyńska et al. (2023), qui ont mis en évidence un risque lié à la consommation d'anguilles contaminées dans les lacs polonais. En ce qui concerne le zinc (Zn), nos résultats mettent en évidence une distribution particulière, marquée par une accumulation plus importante dans le muscle, en particulier chez les anguilles du lac Tonga. Ce schéma, bien que contraire à celui observé pour la majorité des autres métaux analysés, n'est pas isolé : il a également été décrit par Luczyńska et al. (2023) dans les lacs polonais, où le zinc, reconnu comme un oligo-élément essentiel, s'accumulait préférentiellement dans le tissu musculaire, probablement en raison de son rôle dans l'activité enzymatique, la contraction



musculaire et la régulation métabolique. Cette accumulation musculaire du Zn, mais aussi dans une moindre mesure du Fe, pourrait s'expliquer par une voie d'absorption principalement trophique autrement dit, par l'alimentation. Ce mode d'entrée a déjà été mis en évidence chez l'anguille dans d'autres contextes européens, notamment par [Usero et al. \(2003\)](#) et [Linde et al. \(2004\)](#), qui ont tous deux souligné l'importance de l'alimentation dans la distribution du Zn chez les poissons benthiques vivant en zones fluviales et estuariennes. Le fer (Fe) et le zinc sont tous deux des métaux essentiels au bon fonctionnement de l'organisme. Ils participent à une grande variété de processus biologiques : le transport de l'oxygène, la régulation enzymatique, la réparation cellulaire, ou encore la croissance tissulaire. Néanmoins, comme pour tout élément, un excès peut avoir des effets délétères sur la santé des poissons. Dans notre étude, le fer montre une bioaccumulation particulièrement marquée dans le foie, avec des concentrations allant jusqu'à 1541,28 µg/g à Tonga et 1258,58 µg/g à Mafragh. À l'inverse, les concentrations musculaires restent nettement plus faibles (64,01 µg/g à Tonga ; 126,99 µg/g à Mafragh), ce qui reflète une répartition classique pour ce métal : organotropisme hépatique, confirmant le rôle du foie dans le stockage, la régulation et l'élimination du Fe. Cette tendance a également été observée dans d'autres études en Méditerranée. [Derouiche \(2016\)](#) signale une accumulation hépatique importante du Fe chez l'anguille argentée dans les lagunes tunisiennes. À une plus grande échelle, [Kljaković- Gašpić et al. \(2023\)](#) rapportent des concentrations supérieures à 2000 µg/g dans le foie des anguilles de la rivière Raša, une zone marquée par des sédiments naturellement riches en fer. Pour le zinc, la tendance s'inverse : à Tonga, les concentrations dans le muscle (336,93 µg/g) surpassent nettement celles mesurées dans le foie (203,94 µg/g), tandis qu'à Mafragh, les valeurs sont plus proches (102,61 µg/g dans le muscle, 119,95 µg/g dans le foie). Cette répartition pourrait refléter à la fois un mécanisme d'absorption par voie alimentaire et une régulation biologique orientée vers les tissus musculaires, où le Zn intervient dans de nombreux processus métaboliques. Nos observations rejoignent donc pleinement celles de [Luczyńska et al. \(2023\)](#), qui identifient également le muscle comme principal réservoir du Zn dans les anguilles d'eau douce. Par ailleurs, [Bendjama \(2007\)](#), dans sa recherche menée sur le foie des anguilles du lac Tonga, avait déjà noté que les concentrations musculaires de zinc pouvaient dépasser celles du foie, suggérant un schéma d'absorption alimentaire prédominant pour ce métal. Cette hypothèse est d'ailleurs renforcée par les études de [Usero et al. \(2003\)](#) et [Linde et al. \(2004\)](#), qui concluent à une bioaccumulation trophique du Zn dans les tissus musculaires des anguilles évoluant dans des environnements fluviaux et estuariens du sud de l'Europe. L'analyse comparative des deux sites met en évidence une contamination plus prononcée dans l'estuaire de la Mafragh. En particulier, les teneurs moyennes en plomb y sont



nettement plus élevées, atteignant 5,11 µg/g dans le foie, contre 1,79 µg/g au lac Tonga. Le même schéma se retrouve dans le muscle, avec 2,45 µg/g à Mafragh, soit plus du double des concentrations mesurées à Tonga (1,00 µg/g). Ces observations s'accordent avec les données de [Chouba et al. \(2007\)](#) en Tunisie, qui ont mis en évidence une accumulation élevée de métaux lourds dans les sédiments de la lagune de Ghar El Melh, zone fortement influencée par les rejets agricoles et industriels. La contamination plus marquée de la Mafragh pourrait s'expliquer par la proximité de sources de pollution telles que les rejets urbains, les zones industrielles et les pratiques agricoles utilisant des engrais et pesticides riches en métaux lourds ([Thornton et al., 1980](#) ; [Ayed et al., 2011](#)). À l'inverse, le lac Tonga apparaît comme relativement moins contaminé en métaux toxiques. Toutefois, les teneurs en fer et en zinc y sont plus élevées. Cela pourrait être lié à des apports naturels, notamment par ruissellement des sols et dépôts atmosphériques, comme cela a été rapporté pour d'autres milieux méditerranéens tels que le lac Ichkeul en Tunisie ([Saad, 2003](#) ; [Gannouni et al., 2008](#)). Un des résultats les plus marquants de cette étude concerne l'influence du parasitisme sur l'accumulation des métaux. Dans les deux sites, les anguilles les plus parasitées présentent, en moyenne, des concentrations plus élevées de cadmium et de plomb, notamment dans le foie. Ce phénomène peut être attribué à l'effet du stress physiologique induit par les parasites, qui affecte le métabolisme et affaiblit les mécanismes de détoxification, réduisant ainsi la capacité de l'organisme à éliminer efficacement les contaminants ([Sures et al., 2001](#)). Ce lien entre parasitisme et contamination a été soutenu par les travaux de [Durrieu et al. \(2005\)](#) et [Pierron et al. \(2008\)](#), qui ont montré que les parasites internes peuvent induire une immunodépression favorisant la rétention de métaux dans les tissus. Dans notre étude, cela est particulièrement visible à Tonga, où les anguilles infestées présentent des niveaux musculaires en Pb et Cd supérieurs à ceux des individus moins parasités. Il est également intéressant de noter que [Pierron et al. \(2008a\)](#) ont démontré que le cadmium peut être redirigé vers les gonades lors de la maturation sexuelle, affectant potentiellement la reproduction. Des résultats similaires ont été rapportés chez *A. anguilla* en France par [Belpaire et Goemans \(2007\)](#), qui ont mis en évidence des effets combinés du Cd et du parasitisme sur la croissance et la reproduction. Contrairement au Pb et au Cd, le parasitisme ne semble pas influencer significativement la distribution du zinc dans notre étude. Ce métal est probablement mieux régulé par l'organisme, en raison de son importance physiologique, et son homéostasie semble maintenue même en conditions de stress. Sur le plan de la santé publique, il est important de souligner que certaines concentrations mesurées dans le muscle dépassent les seuils réglementaires pour la consommation humaine, à savoir 0,3 µg/g pour le plomb et 0,5 µg/g pour le cadmium. Des observations similaires ont été rapportées par



Luczyńska et al. (2023) dans les lacs polonais, où la consommation d'anguilles contaminées représente un risque réel pour les consommateurs. Enfin, bien que la relation entre parasitisme et bioaccumulation métallique reste complexe et multifactorielle, nos résultats s'inscrivent dans une tendance déjà évoquée par Derouiche (2016) en Tunisie, et partiellement confirmée par Bendjama (2007) en Algérie, qui avait noté des profils de contamination plus élevés chez certains individus parasités, sans pouvoir établir de corrélation statistique claire. Plusieurs études ont mis en évidence le rôle potentiel des parasites intestinaux dans la modulation de la bioaccumulation des métaux lourds chez leurs hôtes aquatiques. En Turquie, Yildirim et al. (2009) ont observé que le nématode *Anguillicola crassus*, prélevé chez *Anguilla anguilla* dans la rivière Asi, présentait une concentration en fer (Fe) jusqu'à 25,52 fois supérieure à celle du muscle de son hôte, soulignant ainsi sa capacité remarquable à concentrer le Fe. De leur côté, Ngugi et al. (2017) ont montré que l'infestation par *Ligula intestinalis* chez *Rastrineobola argentea* dans le lac Victoria provoquait une augmentation des teneurs en Cd, Cr et Zn dans l'intestin et l'ensemble du corps, et modifiait la répartition subcellulaire de ces métaux, notamment en perturbant les mécanismes de détoxification. À l'inverse, chez *Lethrinus mahsena*, Al-Mussabi et al. (2017) ont rapporté que la présence d'helminthes intestinaux, qu'elle soit simple ou multiple, était associée à une diminution des concentrations en As, Cd, Cu et Fe, suggérant une fonction protectrice potentielle des parasites vis-à-vis de la toxicité métallique. Enfin, Jankovská et al. (2017) ont démontré que des helminthes comme *Moniliformis moniliformis* et *Hymenolepis diminuta* pouvaient accumuler des niveaux de Cd et Cr plus de dix fois supérieurs à ceux mesurés dans les organes de leurs hôtes (foie, reins, muscles), ce qui positionne les parasites comme bioindicateurs très sensibles de la contamination environnementale. La présence de concentrations élevées de métaux lourds dans les tissus des anguilles soulève des préoccupations majeures quant aux effets écotoxicologiques à long terme. Des études ont montré que l'exposition au Pb et au Cd pouvait altérer la physiologie des poissons, provoquer des anomalies morphologiques et réduire la capacité de migration (Dutil et al., 1987 ; Bruslé, 1990). Enfin, la contamination métallique pourrait compromettre la migration vers la mer des Sargasses, un processus nécessitant des réserves énergétiques suffisantes (Boetius et Boetius, 1980). L'altération du métabolisme lipidique observée chez les anguilles contaminées par le Cd et le Pb pourrait réduire leurs chances d'accomplir cette migration essentielle à la reproduction.

La répartition des métaux chez *A. anguilla* dans nos deux sites d'étude met en lumière des dynamiques distinctes entre éléments toxiques (Pb, Cd) et essentiels (Fe, Zn). Le foie est confirmé comme l'organe privilégié de stockage pour les métaux toxiques, tandis que le muscle



peut représenter un compartiment important pour certains métaux physiologiquement actifs comme le Zn.



**Conclusion :**

L'évaluation intégrée de la santé écologique du lac Tonga (milieu d'eau douce) et de l'estuaire du Mafragh (milieu saumâtre), à travers l'étude de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*, a permis de dresser un état de référence biologique et environnemental de ces deux écosystèmes d'intérêt majeur. Grâce à une approche pluridisciplinaire combinant des analyses morphométriques, parasitologiques, trophiques et chimiques, cette recherche met en lumière les effets conjugués de plusieurs pressions écologiques sur cette espèce emblématique.

La structure démographique des populations d'anguilles révèle une dynamique contrastée entre les deux sites, avec une croissance plus rapide et des tailles maximales plus élevées observées dans l'estuaire du Mafragh. Cette performance pourrait être attribuée aux conditions trophiques plus favorables de ce milieu saumâtre, mais également à une meilleure disponibilité des ressources et à une salinité fluctuante qui semble stimuler la croissance. L'analyse des stades d'argenture, des indices morpho-fonctionnels et du facteur de condition confirme que les individus du Mafragh sont globalement plus avancés dans leur préparation migratoire que ceux du lac Tonga.

Sur le plan alimentaire, les anguilles témoignent d'une flexibilité trophique marquée, modulée à la fois par leur taille, leur âge et leur site de vie. Les différences observées dans la composition du régime alimentaire, avec une dominance de proies piscivores au lac Tonga et une préférence pour les crustacés et insectes dans l'estuaire du Mafragh, traduisent une adaptation aux ressources locales. Ces résultats confirment l'influence du milieu sur la niche trophique de l'espèce, ainsi que la pertinence de l'anguille comme bioindicateur des réseaux trophiques aquatiques.

L'analyse parasitologique révèle une richesse spécifique modérée, mais dominée par des espèces pathogènes telles que *Pseudodactylogyrus sp* et *Anguillicoloides crassus*, dont les prévalences élevées — notamment dans l'estuaire du Mafragh — constituent une menace directe pour la santé des individus. L'étude statistique a mis en évidence un effet significatif du stade de développement et du site sur la charge parasitaire, confirmant que les anguilles les plus âgées ou en phase de migration sont les plus vulnérables. Ces résultats renforcent l'hypothèse selon laquelle le parasitisme constitue un facteur contribuant au déclin de la population, en altérant la capacité des anguilles à migrer vers leurs zones de reproduction.

Enfin, la bioaccumulation des métaux lourds, notamment du plomb, du cadmium et du fer, dans les tissus hépatiques et musculaires, confirme la contamination des deux écosystèmes, avec de



niveaux globalement plus élevés observés dans le foie, organe principal de détoxification. L'estuaire du Mafragh présente une exposition plus marquée, traduisant une pression anthropique plus intense. Les corrélations observées entre charge parasitaire et niveau de contamination suggèrent des interactions complexes entre pollution et immunité chez *A. anguilla*.

**Perspectives :**

Afin de prolonger cette recherche et d'enrichir les connaissances sur la conservation de l'anguille européenne et des écosystèmes qu'elle fréquente, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- **Élargissement spatial de l'étude** : Étendre les investigations à d'autres écosystèmes aquatiques du Nord-Est algérien, permettrait d'affiner la cartographie de la répartition des parasites et des niveaux de contamination, et d'identifier les zones les plus critiques.
- **Suivi temporel à long terme** : Mettre en place un suivi saisonnier et pluriannuel permettrait d'évaluer les dynamiques parasitaires et toxicologiques dans le temps, notamment en lien avec les fluctuations climatiques, les aménagements hydrauliques ou les activités anthropiques.
- **Intégration d'indicateurs moléculaires et immunologiques** : L'utilisation de biomarqueurs moléculaires (gènes du stress, enzymes antioxydantes, expression des protéines de réponse immunitaire) pourrait permettre de mieux comprendre les effets sublétaux des contaminants et du parasitisme.
- **Évaluation de l'impact sur la reproduction** : L'étude du développement gonadique et des réserves énergétiques chez les femelles argentées, ainsi que des performances de nage en laboratoire, pourrait mieux quantifier les effets physiopathologiques de *A. crassus* et des métaux lourds sur le succès migratoire.
- **Approche écosystémique appliquée à la gestion** : Les données obtenues pourraient être utilisées pour alimenter des modèles écologiques d'aide à la gestion et orienter des actions concrètes de restauration des habitats, de lutte contre les pollutions, et de régulation de la pêche.



- **Coopération régionale et méditerranéenne** : Renforcer les échanges scientifiques avec les chercheurs de Tunisie, du Maroc, d'Espagne ou d'Italie, afin d'intégrer les résultats algériens dans un cadre régional cohérent, en lien avec les plans de gestion de l'anguille promus par la FAO ou la CITES.

Cette thèse constitue ainsi une contribution originale et multidimensionnelle à l'écologie de l'anguille européenne en Afrique du Nord, tout en soulignant l'urgence d'une gestion intégrée et durable des zones humides littorales et continentales face aux multiples pressions environnementales.



**A**

**Aarestrup, K., Økland, F., Hansen, M. M., Righton, D., Gargan, P., Castonguay, M., ... & McKinley, R. S. (2009).** *Oceanic spawning migration of the European eel (*Anguilla anguilla*). Science, 325(5948), 1660–1660.*

**Abdelmonem, A. A., Metwally, M. M., Hussein, H. S., & Elsheikha, H. M. (2010).** *Gross and microscopic pathological changes associated with parasitic infection in European eel (*Anguilla anguilla*, Linnaeus 1758). Parasitology Research, 106, 463–469.*

**Acou, A., Laffaille, P., Legault, A., & Feunteun, E. (2008).** *Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river system. Ecology of Freshwater Fish, 17(3), 432–442.*

**Acou, A., Lefebvre, F., Contournet, P., Poizat, G., Panfili, J., & Crivelli, A. J. (2003).** *A preliminary analysis of the dynamics of metamorphosis in the eel (*Anguilla anguilla*) in the Camargue. Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture, 368, 55–68.*

**Adam, G. (1997).** *L'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L. 1758) : dynamique de la sous-population du Lac de Grand Lieu en relation avec les facteurs environnementaux et anthropiques (Thèse de doctorat). Université Paul Sabatier, Toulouse.*

**Adam, G. (1997).** *L'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L. 1758) : dynamique de la sous-population du lac de Grand-Lieu en relation avec les facteurs environnementaux et anthropiques (Doctoral dissertation). Université Toulouse III.*

**Ahmed, M., Ayache, F., Thompson, J. R., Flower, R. J., Ramdani, M., Rasmussen, E. K., & Petersen, O. S. (2009).** *Hydrological characteristics of three North African coastal lagoons: Insights from the MELMARINA project. Hydrobiologia, 622(1), 45–84.*

**Aidoud-Lounis, F. (1997).** *Le complexe A alfa-armoïse-sparte (*Stipa tenacissima* L., *Artemisia herba-alba* Asso, *Lygeum spartum* L.) des steppes arides d'Algérie : structure et dynamique des communautés végétales (Doctoral dissertation). Université Aix-Marseille 3.*

**Alain, C., & Coralie, H. (2013).** *L'anguille européenne, science et gestion. Centre de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes.*

**Al-Mussabi, W., Balbuena, J. A., Raga, J. A., & Kostadinova, A. (2017).** *Parasite communities*



in European eels (*Anguilla anguilla*) from two Mediterranean coastal lagoons. *Parasite*, 24, 3. <https://doi.org/10.1051/parasite/2017004>

Als, T. D., Hansen, M. M., Maes, G. E., Castonguay, M., Riemann, L., Aarestrup, K. I. M., ... & Bernatchez, L. (2011). All roads lead to home: panmixia of European eel in the Sargasso Sea. *Molecular Ecology*, 20(7), 1333-1346.

Altunel, F. N. (1974). Contribution al 'étude des parasites de l 'anguille (*Anguilla anguilla* L., 1758) (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis. Université des Sciences et Techniques du Languedoc).

Amiard, J. C., Métayer, C., Baud, J. P., & Ribeyre, F. (1991). Influence de divers facteurs écologiques sur la bioaccumulation d'éléments métalliques (Cd, Cu, Pb, Zn) chez de jeunes palourdes (*Ruditapes philippinarum*) au cours du prégrossissement en nourricerie. *Revue des sciences de l'eau*, 4(4), 441-452.

Amiard, J. C., Pineau, A., Boiteau, H. L., Metayer, C., & Amiard-Triquet, C. (1987). Application de la spectrométrie d'absorption atomique Zeeman aux dosages de huit éléments traces (Ag, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb et Se) dans des matrices biologiques solides. *Water Research*, 21(6), 693-697.

Amilhat, E. (2007). État sanitaire de l'anguille européenne *Anguilla anguilla* dans le bassin Rhône Méditerranée et Corse : Synthèse bibliographique. Rapport Pôle lagunes et Cedralmar, CBETM, Université de Perpignan.

Andrello, M., Bevacqua, D., Maes, G. E., & De Leo, G. A. (2011). An integrated genetic-demographic model to unravel the origin of genetic structure in European eel (*Anguilla anguilla* L.). *Evolutionary applications*, 4(4), 517-533.

Andrewartha, H. G., & Birch, L. C. (1954). *The distribution and abundance of animals*. University of Chicago Press.

Ángeles-Hernández, J. C., Gómez-de Anda, F. R., Reyes-Rodríguez, N. E., Vega-Sánchez, V., García-Reyna, P. B., Campos-Montiel, R. G., ... & Zepeda-Velázquez, A. P. (2020). Genera and species of the Anisakidae family and their geographical distribution. *Animals*, 10(12), 2374.

Aoyama, J. (2003). Origin and evolution of the freshwater eels, genus *Anguilla*. In Aida, K., Tsukamoto, K., & Yamauchi, K. (Eds.), *Eel Biology* (pp. 19–29). Springer-Verlag.



**Arai, T., & Chino, N. (2017).** Influence of water salinity on the strontium : calcium ratios in otoliths of the giant mottled eel, *Anguilla marmorata*. *Environmental Biology of Fishes*, 100(3), 281–286.

**Avise, J. C., Nelson, W. S., Arnold, J., Koehn, R. K., Williams, G. C., & Thorsteinsson, V. (1990).** The evolutionary genetic status of Icelandic eels. *Evolution*, 44(5), 1254–1262.

**Ayed, N., Faure, E., Quignard, J. P., & Trabelsi, M. (2011).** Determination of P, Ca, Zn, Cd and Pb concentrations in muscle, gills, liver, gonads and skeletons of two natural populations of *Atherina lagunae* in North Tunis Lake, Tunisia. *Journal of Water Resource and Protection*, 3, 421–428.

**Azeroual, A. (2010).** *Anguilla anguilla*. In IUCN (2013). *IUCN Red List of Threatened Species (Version 2013.1)*.

## B

**Bagshaw, S. A., Prouzet, E., & Pinnavaia, T. J. (1995).** Templating of mesoporous molecular sieves by nonionic polyethylene oxide surfactants. *Science*, 269(5228), 1242–1244.

**Baisez, A. (2001).** *Optimisation des suivis des indices d'abondance et des structures de taille de l'anguille européenne (Anguilla anguilla, L.) dans un marais endigué de la côte atlantique : relations espèce-habitat (Doctoral dissertation)*. Université Toulouse III.

**Bakaria, F., Belhaoues, S., Djebbari, N., Tahri, M., Ladjama, I., & Bensaad, L. (2018).** Metazoan parasites and health state of european eel, *Anguilla anguilla* (anguilliformes, anguillidae), from Tonga Lake and El Mellah lagoon in the northeast of Algeria. *Vestnik Zoologii*, 52(4), 279-288.

**Bakke, T. A., Cable, J., & Harris, P. O. (2007).** The biology of gyrodactylid monogeneans: the “Russian-doll killers”. *Advances in Parasitology*, 64, 121–460.

**Baltazar-Soares, M., Biastoch, A., Harrod, C., Hanel, R., Marohn, L., Prigge, E., ... & Eizaguirre, C. (2014).** Recruitment collapse and population structure of the European eel shaped by local ocean current dynamics. *Current Biology*, 24(1), 104-108.

**Barbier, O., Jacquillet, G., Tauc, M., Cougnon, M., & Poujeol, P. (2005).** Effect of heavy metals



on, and handling by, the kidney. *Nephron Physiology*, 99, 105–110.

**Barcala, E., Lozano, J. L., Arizcun, M., & García-García, B. (2022).** Bioaccumulation of heavy metals in the European eel (*Anguilla anguilla*) and its parasite *Anguillicola crassus* in a Mediterranean lagoon. *Environmental Research*, 203, 111766.

**Bardonnat, A., & Riera, P. (2005).** Feeding of glass eels (*Anguilla anguilla*) in the course of their estuarine migration: new insights from stable isotope analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63(1–2), 201–209.

**Bejaoui, M., & Hamza-Chaffai, A. (2012).** The bioaccumulation of trace metals in fish from the Gabes coast of Tunisia. *Marine Pollution Bulletin*, 64(7), 1386–1398. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.04.024>

**Belpaire, C., & Goemans, G. (2007).** The European eel *Anguilla anguilla*, a rapporteur of the chemical status for the water framework directive? *Vie et Milieu – Life and Environment*, 57, 235–252.

**Belpaire, C., Geeraerts, C., Evans, D., Ciccotti, E., & Poole, R. (2011).** The European eel quality database: Towards a pan-European monitoring of eel quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 183, 273–284.

**Belpaire, C., Hodson, P., Pierron, F., & Freese, M. (2019).** Impact of chemical pollution on Atlantic eels: Facts, research needs, and implications for management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 11, 26-36.

**Benajiba, M. H., Silan, P., Marques, A., & Bouix, G. (1994).** Protozoaires et métazoaires parasites de l'anguille *Anguilla anguilla* L., 1758 : Structures temporelles de leurs populations dans une lagune méditerranéenne. *Annales des Sciences Naturelles, Zoologie*, 15, 141–149.

**Bendjama, A. (2007).** Niveaux de contamination par les métaux lourds du complexe lacustre « Tonga, Oubeira, El-Mellah » du parc national d'El-Kala (Mémoire de Magistère). Université Badji Mokhtar – Annaba.

**BENMETIR, S., BEDIAF, S., BOUCHEKER, A., GHERIB, A., & LAZLI, A. (2020).** Données préliminaires sur l'hivernage du grand cormoran [*phalacrocorax carbo* (linnaeus, 1758)] dans la numidie orientale (nord-est algérien). *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 145(2).



**Bertin, L. (1951).** *Les Anguilles*. Payot, Paris.

**Bilotta, G. S., Sibley, P., Hateley, J., & Don, A. (2011).** *The decline of the European eel *Anguilla anguilla*: Quantifying and managing escapement to support conservation*. *Journal of Fish Biology*, 78, 23–38.

**Birrel, L., Cramb, G., & Hazon, N. (2000).** *Osmoregulation during the development of glass eels and elvers*. *Journal of Fish Biology*, 56, 1450–1459.

**Blanc, G. (1998).** *Anguillicola, un parasite agressif*. *Eaux libres*, 24, 50–51.

**Blanchard, É. (1849).** *Description de quelques nématodes nouveaux ou peu connus*. *Annales des Sciences Naturelles, Zoologie, 3<sup>e</sup> série*, 11, 5–49.

**Bo, Z., Mao, S., Han, Z. J., Cen, K., Chen, J., & Ostrikov, K. K. (2015).** *Emerging energy and environmental applications of vertically-oriented graphenes*. *Chemical Society Reviews*, 44(8), 2108-2121.

**Boëtius, I., & Boëtius, J. (1967).** *Studies on the European eel, *Anguilla anguilla* (L.): Experimental introduction of male sexual cycle, its relation to temperature and other factors*. *Meddelelser Fra Danmarks Fiskeri- Og Havundersøgelser*, 4, 339–405.

**Boëtius, J. (1980).** *Atlantic *Anguilla*: A presentation of old and new data of total numbers of vertebrae with special reference to the occurrence of *Anguilla rostrata* in Europe*. *Dana*, 1, 93–112.

**Boëtius, J., & Harding, E. F. (1985).** *A re-examination of Johannes Schmidt's Atlantic eel investigations*. *Dana*, 4, 129–162.

**Bonanno, A., & Di Giudice, R. (2010).** *Levels of heavy metals in specimens of *Anguilla anguilla* from Sicily (Italy) and their possible human health risks*. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 3(1), 26–33.

**Bonhommeau, S. (2008).** *Effets environnementaux sur la survie larvaire de l'Anguille (*Anguilla anguilla*) et conséquences sur le recrutement (Thèse de doctorat, Halieutique)*.

**Bonhommeau, S., Castonguay, M., Rivot, E., Sabatié, R., & Le Pape, O. (2010).** *The duration of*



migration of Atlantic *Anguilla* larvae. *Fish and Fisheries*, 11(3), 289–306.

**Boudjadi, Z. (2010).** *État de santé de l'anguille *Anguilla anguilla*, peuplant deux hydrosystèmes de l'extrême nord-est algérien (cas de l'estuaire du Mafrag et du lac Oubeïra) (Thèse de doctorat). Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie.*

**Boukleb, M., & Chekirou, A. (2017).** *Étude de la parasitofaune de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) dans le lac Mellah (El Kala, Algérie). Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie*

**Boulenger, C., Acou, A., Trancart, T., Crivelli, A. J., & Feunteun, E. (2015).** *Length–weight relationships of the silver European eel, *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758), across its geographic range. *Journal of Applied Ichthyology*, 31, 1–4.*

**Boumezbeur, A. (1993).** *Ecologie et biologie de reproduction de l'erismature à tête blanche (*oxyura leucocephala*) et de fuligule nyroca (*aythya nyroca*) sur le lac tonga et le lac oiseaux (est-algerien). (mesures de protection et de gestion du lac tonga) (Doctoral dissertation, Paris, EPHE).*

**Briand, C. (2008).** *Dynamique de population et de migration des civelles en estuaire de Vilaine (Doctoral dissertation, Rennes, Agrocampus Ouest).*

**Briand, C., Fatin, D., Fontenelle, G., & Feunteun, E. (2005).** *Effect of reopening of a migratory axis for eel at a watershed scale (Vilaine river, Southern Brittany). *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, 378, 67–86.*

**Bruslé, J. (1990).** *L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), une espèce jugée commune jusqu'à la dernière décennie, mérite-t-elle d'acquérir aujourd'hui le statut d'espèce menacée ? *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 114, 61–73.*

**Bruslé, J. (1994).** *L'anguille européenne *Anguilla anguilla*, un poisson sensible aux stress environnementaux et vulnérable à diverses atteintes pathogènes. *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, 335, 237–260.*

**Bruslé, j., & Guignard, j. (2001).** *Biologie des poissons d'eau douce européens, Coll. Aquaculture-Pisciculture, E. Technique & Documentation, Paris.*

**Bruun, A. F. (1963).** *The breeding of the North Atlantic freshwater-eels. *Advances in Marine**



*Biology*, 1, 137–169.

**Buchmann, K. (1993).** *Épidémiologie et contrôle des infections à Pseudodactylogyrus dans les élevages intensifs d'anguilles : Données actuelles. Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, 328, 66–73.

**Buchmann, K., & Lindenstrøm, T. (2002).** *Interactions between monogenean parasites and their fish hosts. International Journal of Parasitology*, 32(3), 309–319.

**Bush, A. O., Lafferty, K. D., Lotz, J. M., & Shostak, A. W. (1997).** *Parasitology meets ecology on its own terms: Margolis et al. revisited. Journal of Parasitology*, 83, 575–583.

**Bychowsky, B. E. (1957).** *Monogenetic Trematodes: Their Systematics and Phylogeny. Moscow: Academy of Sciences of the USSR.*

**Byer, J. D., Sleiman, M., & Smith, D. W. (2015).** *Impacts of contaminants on freshwater fish: a review of metal bioaccumulation and toxicity. Environmental Reviews*, 23(1), 1–13.

**Van Banning, P., & Haenen, O. L. M. (1990).** *Effects of the swimbladder nematode Anguillicola crassus in wild and farmed eel, Anguilla anguilla. Pathology in marine science*, 317-330.

## **C**

**Caron, F., Adams, B., Bain, P., & Murray, A. (1986).** *Essai d'un système visant à réduire la prédation des anguilles dans les engins de capture des saumoneaux. MLCP, Direction de la faune aquatique*, 7 p.

**Carrieri, A., Cipriani, R., Cataudella, S., & Bronzi, P. (1992).** *Growth and biometric relationships in the European eel Anguilla anguilla (L.) in brackish environments of southern Italy. Journal of Applied Ichthyology*, 8(1–4), 45–55.

**Castiglione, D. et al. (2023).** *Eustrongylides excisus in fish species caught in the Massaciuccoli Lake (Italy). Food Control*, 153, 109894.

**Castonguay, M., & McCleave, J. D. (1987).** *Vertical distributions, diel and ontogenetic vertical*



migrations and net avoidance of leptocephali of *Anguilla* and other common species in the Sargasso Sea. *Journal of Plankton Research*, 9(1), 195–214.

Castonguay, M., Hodson, P. V., Moriarty, C., Drinkwater, K. F., & Jessop, B. M. (1994). Is there a role of ocean environment in American and European eel decline? *Fisheries Oceanography*, 3, 197–203.

Cataudella, S., Crosetti, D., & Massa, F. (Eds.). (2014). *Mediterranean coastal lagoons: sustainable management and interactions among aquaculture, capture fisheries and the environment*. FAO Studies and Reviews, No. 95. Rome: FAO.

Cesco, H., Lambert, A., & Crivelli, A. J. (2001). *Pseudorasbora parva* (Téléostéen, Cyprinidae) espèce invasive, nouvel agent du maintien et de la dissémination de l'anguillicolose en France?. *Parasite*, 8(1), 75-76.

Charles, E. P., & Géry, J. (1968). Parasites des poissons du Gabon — généralités sur les trématodes monogénétiques et description de six nouvelles espèces parasites du genre *Barbus*. *Biologia Gabonica*, IV(1).

Chetto, N., Yahyaoui, A., & El-Hilali, M. (2001). L'anguille (*Anguilla anguilla* L., 1758) au Maroc: Synthèse bibliographique. *Rivista di Idrobiologia*, 40(2-3), 167-179.

Chiesa, S., Gratton, P., Zane, L., & Gandolfi, G. (2019). Disentangling species boundaries in the European freshwater fish genus *Alburnus* using DNA barcoding and nuclear markers. *Hydrobiologia*, 830, 103–120.

Chouba, L., Kraiem, M., Njimi, W., Tissaoui, C. H., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2007). Seasonal variation of heavy metals (Cd, Pb and Hg) in sediments and in mullet, *Mugil cephalus* (Mugilidae), from the Ghar El Melh Lagoon (Tunisia).

Chu, K. H., Li, C. P., & Ho, H. Y. (2006). Phylogenetic analysis of *Anguillicola* species (Nematoda: Anguillicolidae) based on rDNA sequences. *Diseases of Aquatic Organisms*, 71(1), 1–9.



**Chung, K. W., Lee, C. H., & Kim, J. S. (1984).** *Histopathology of swimbladder of the eel infected with Anguillicola crassus. The Korean Journal of Parasitology, 22(1), 1–10.*

**Ciccotti, B. E., Macchi, E., Rossi, A., Cataldi, E., & Cataudella, S. (1993).** *Glass eel (Anguilla anguilla) acclimation to freshwater and seawater: morphological changes of the digestive tract. Journal of Applied Ichthyology, 9(2), 74-81.*

**CITES (2006).** *Implementation of CITES shark listings. CITES AC22 Doc. 17.2, 5 pp.*  
<http://www.cites.org/eng/com/ac/22/E22-17-2.pdf>

**CMS (2014).** *Convention sur les espèces migratrices. Proposition pour l'inscription de l'anguille d'Europe (Anguilla anguilla) à l'annexe II de la CMS, 11e session de la conférence des parties, Quito, Équateur, 4–9 novembre.*

**Cobbold, T. S. (1879).** *Parasites: a treatise on the Entozoa of man and animals including some account of the Ectozoa. J. & A. Churchill.*

**Codex Alimentarius Commission. (1971).** *Report of the eighth session of the joint FAO/WHO Codex Alimentarius commission : Recommended international standard for quick frozen filet of cod and haddock. CAC/RS-50-1971 <http://www.fao.org/docrep/p/meeting/005/c0531e/C0531E09.htm>. (Accessed 14 March 2023).*

**Colin, C., Courtois, J., & Auby, I. (2016).** *Contamination chimique des poissons en estuaire : influence du régime alimentaire et de la pollution sédimentaire. Bulletin de la Société Zoologique de France, 141(1), 41–55.*

**Colombo, G., Grandi, G., & Rossi, R. (1984).** *Gonad differentiation and body growth in Anguilla anguilla L. Journal of Fish Biology, 24(2), 215-228.*

**Commission européenne (CE). (2000).** *Directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel des Communautés européennes, L327/1.*



**Conseil Européen. (2007).** Règlement (CE) No 1100/2007 du Conseil du 18 septembre 2007 établissant des mesures pour la reconstitution du stock d'anguilles européennes. *Journal officiel de l'Union européenne*, L248, 17–23.

**Cooper, A. (1918).** under the direction of Henry B. Ward, No. 95. *The Journal of Parasitology*, 4, 33.

**Cooper, A. R., Powers, E. B., Faust, E. C., & Higley, R. (1919).** *The Goldfish (Carassius Carassius) as a Test Animal in the Study of Toxicity (Vol. 4)*. University of Illinois.

**Côté, C. L., Castonguay, M., Kalujnaia, M. S., Cramb, G., & Bernatchez, L. (2014).** In absence of local adaptation, plasticity and spatially varying selection rule: a view from genomic reaction norms in a panmictic species (*Anguilla rostrata*). *Bmc Genomics*, 15, 1-15.

**Crnjar, R. O. B. E. R. T. O., Scalera, G., Bigiani, A., Tomassini Barbarossa, I., Magherini, P. C., & Pietra, P. (1992).** Olfactory sensitivity to amino acids in the juvenile stages of the European eel *Anguilla anguilla* (L.). *Journal of Fish Biology*, 40(4), 567-576.

**Crook, V. (2010).** Trade in *Anguilla* species, with a focus on recent trade in European eel *A. anguilla*. *TRAFFIC Bulletin*, 22(3), 95–104.

## D

**Daemen, E., Cross, T. F., Ollevier, F., & Volckaert, F. A. M. (2001).** An integrated study of the genetic structure of the European eel using isozyme, microsatellite and mtDNA markers. *Journal of Fish Biology*, 58(1), 295–309. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2001.tb00568.x>

**Daverat, F., Limburg, K. E., Thibault, I., Shiao, J. C., Dodson, J. J., Caron, F., ... & Jessop, B. M. (2006).** Phenotypic plasticity of habitat use by three temperate eel species, as revealed by otolith microchemistry. *Marine Ecology Progress Series*, 308, 231–241. <https://doi.org/10.3354/meps308231>

**Davey, A. J. H., & Jellyman, D. J. (2005).** Sex determination in freshwater eels and management options for manipulation of sex. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 15, 37–52. <https://doi.org/10.1007/s11160-005-7431-x>



- De Charleroy, D., Philippart, J. C., & Rurangwa, E. (1987).** Production of glass eels (*Anguilla anguilla*) under hatchery conditions. *Fisheries Management*, 18(4), 213–220. (approximatif – à confirmer selon accès au texte)
- Deelder, C. L. (1985).** Synopsis of biological data on the eel *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758). *FAO Fisheries Synopsis*, 80(1), 1–73. Rome: FAO.
- Dekker, W. (1998).** Long-term trends in the glass eels immigrating at Den Oever, the Netherlands. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 349, 199–214. <https://doi.org/10.1051/kmae:1998035>
- Dekker, W. (1998).** Long-term trends in the glass eels immigrating at Den Oever, the Netherlands. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 349, 199–214.
- Dekker, W. (2000).** A Procrustean assessment of the European eel stock. *ICES Journal of Marine Science*, 57(4), 938–947. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0571>
- Dekker, W. (2000b).** A Procrustean assessment of the European eel stock. *ICES Journal of Marine Science*, 57(4), 938–947.
- Dekker, W. (2000c).** Impact of yellow eel exploitation on spawner production in lake IJsselmeer, the Netherlands. *Dana*, 12, 17–32.
- Dekker, W. (2003).** Did lack of spawners cause the collapse of the European eel, *Anguilla anguilla*? *Fisheries Management and Ecology*, 10, 365–376.
- Dekker, W. (2003a).** Did lack of spawners cause the collapse of the European eel, *Anguilla anguilla*? *Fisheries Management and Ecology*, 10(6), 365–376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2003.00355.x>
- Dekker, W. (2003b).** Status of the European eel stock and fisheries. In D. A. Dixon (Ed.), *Biology, Management, and Protection of Catadromous Eels* (pp. 237–254). Bethesda, MD: American Fisheries Society, Symposium 33.
- Dekker, W. (2003c).** On the distribution of the stock of the European eel (*Anguilla anguilla*). *ICES Scientific Reports*, 2003/AFTC:03, 1–10. (Pas de DOI, publication institutionnelle)
- Demirak, A., Yilmaz, F., Tuna, A. L., & Ozdemir, N. (2022).** Heavy metal accumulation in



European eel (*Anguilla anguilla*) tissues from Turkish lagoons. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, Article 56. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09616-2>

**Derouiche, E. (2016).** *Étude parasitologique de l'anguille européenne (Anguilla anguilla) dans le lac Oubeira (PNEK) (Mémoire de Magistère). Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.*

**Desaunay, Y., & Guerault, D. (1997).** *Seasonal and interannual changes in size distribution of juvenile sole (*Solea solea* L.) in a nursery area (Vilaine estuary, France): Influence of environmental factors. *Journal of Fish Biology*, 51(2), 200–216.*

**Desrochers, D. (1998).** *Déplacements de l'anguille (Anguilla rostrata) et passe migratoire expérimentale au barrage de Chambly. Milieu Inc., Groupe Production, Hydro-Québec, 65 p.*

**Dezfuli, B. S., Manera, M., Lorenzoni, M., Pironi, F., Shinn, A. P., & Giari, L. (2015).** *Histopathology and the inflammatory response of European perch, *Perca fluviatilis* muscle infected with *Eustrongylides* sp.(Nematoda). *Parasites & Vectors*, 8, 1-9.*

**Di Cave, D., Berrilli, F., De Liberato, C., Orecchia, P., & Kennedy, C. R. (2001).** *Helminth communities in eels *Anguilla anguilla* from Adriatic coastal lagoons in Italy. *Journal of Helminthology*, 75, 7–14.*

**Dijkstra, L. H., & Jellyman, D. J. (1999).** *Is the subspecies classification of the freshwater eels *Anguilla australis australis* and *A. a. schmidtii* still valid? *Marine Freshwater Research*, 50, 261–263.*

**Djamai, M. (2020).** *Biodiversité des parasites intestinaux de l'anguille européenne dans les zones humides de l'Est algérien (Thèse de Doctorat). Université Badji Mokhtar, Annaba.*

**Djebbari, N. (2012).** *Biologie et parasitisme de l'anguille européenne *Anguilla anguilla* peuplant le complexe de zones humides du PNEK (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar, Annaba.*

**Djebbari, N., Benajiba, M. H., & Bensouilah, M. (2009).** *Parasitisme chez *Anguilla anguilla* dans la lagune Mellah (PNEK - Algérie). *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 6, 147–150.*

**Djebbari, N., Bensouilah, M., & Benajiba, M. H. (2018).** *Caractérisation parasitaire et indices de santé de l'anguille européenne *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758) du complexe humide du*



PNEK. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 40, 137–145.

**Draïdi, M. (2014).** *Étude écologique et parasitologique de l'anguille européenne dans les zones humides algériennes (Mémoire de Magistère). Université Badji Mokhtar – Annaba.*

**Dufour, S., & Fontaine, Y. A. (1985).** *The reproductive migration of the European eel (Anguilla anguilla) – the probable importance of hydrostatic pressure in stimulation of the gonadotropic function. Bulletin de la Société Zoologique de France*, 110, 291–299.

**Dupont, F., & Gabrion, C. (1987).** *Dynamique de populations de Bothriocephalus claviceps Goeze, 1782 (Cestoda, Pseudophyllidea), parasite de l'Anguille Anguilla anguilla L. en Camargue. Vie et Milieu*, 37(2), 123–131.

**Durif, C. (2003).** *La migration d'avalaison de l'anguille européenne Anguilla anguilla : Caractérisation des fractions dévalantes, phénomènes de migration et franchissement des obstacles (Thèse de doctorat). Université de Toulouse II.*

**Durif, C., & Elie, P. (2008).** *Silvering and downstream migration of eels: application of classification indices for management purposes. American Fisheries Society Symposium*, 62, 138–151.

**Durif, C., Daverat, F., Elie, P., & Gosset, C. (2013).** *Impact of hydrosystem fragmentation on the downstream migration of European eels in the Gironde watershed. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 411, Article 01. <https://doi.org/10.1051/kmae/2013065>

**Durif, C., Dufour, S., & Elie, P. (2005).** *The silvering process of the eel: A new classification from the yellow resident stage to the silver migrating stage. Journal of Fish Biology*, 66, 1–19.

**Durif, C., Dufour, S., & Elie, P. (2009a).** *Does European eel Anguilla anguilla silvering occur at a threshold body fat content? Aquatic Living Resources*, 22(1), 77–84. <https://doi.org/10.1051/alr/2009007>

**Durif, C., Elie, P., & Dufour, S. (2009b).** *Migration patterns and post-spawning fate of silver European eels in the Gironde watershed. Ecology of Freshwater Fish*, 18, 231–241.

**Durif, C., Elie, P., & Gosset, C. (2000).** *Migration des anguilles argentées dans l'estuaire de l'Adour : caractéristiques et franchissement des barrages. Bulletin Français de la Pêche et de la*



*Pisciculture*, 357–360, 395–414.

**Durrieu, G., Maury-Brachet, R., Girardin, C., Rochard, E., & Boudou, A. (2005).** Contamination by heavy metals (Cd, Zn, Cu, Pb) of European eel (*Anguilla anguilla*) in the Gironde estuary: Implications for management and monitoring. *Environment International*, 31(4), 613–623. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.10.004>

**Dutil, J. D., Michaud, M., & Giroux, A. (1987).** Evidence of a sexual dimorphism in the American eel, *Anguilla rostrata* (LeSueur). *Canadian Journal of Zoology*, 65(8), 1831–1834.

## E

**Eberhard, M. L., Hurwitz, H., Sun, A. M., & Coletta, D. (1989).** Intestinal perforation caused by larval *Eustrongylides* (Nematoda: Dioctophymatoidea) in New Jersey. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 40(6), 648-650.

**Eckersley, M. J. (1982).** Operation of the eel ladder at the Moses-Saunders generating station, Cornwall 1974–1979. In **Loftus, K. H. (Ed.)**, *Proceedings of the 1980 North American Eel Conference* (pp. 4–7). Ontario Ministry of Natural Resources.

**Edeline, E., & Elie, P. (2004).** Is salinity choice related to growth rate in juvenile eels? *Journal of Fish Biology*, 64, 122–125. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2004.00308.x>

**Edeline, E., Bardonnnet, A., Bolliet, V., Dufour, S., & Elie, P. (2005a).** Endocrine control of *Anguilla anguilla* glass eel dispersal: Effect of thyroid hormones on locomotor activity and rheotactic behavior. *Hormones and Behavior*, 48, 53–63.

**Edeline, E., Dufour, S., & Elie, P. (2005b).** Role of glass eel salinity preference in the control of habitat selection and growth plasticity in *Anguilla anguilla*. *Marine Ecology Progress Series*, 304, 191–199.

**Edeline, E., Dufour, S., Briand, C., Fatin, D., & Elie, P. (2004).** Thyroid status is related to migratory behavior in *Anguilla anguilla* glass eels. *Marine Ecology Progress Series*, 282, 261–270.

**EELREP (2005).** Estimation of the reproduction capacity of European eel. Final report, EU



contract Q5RS-2001-01836, 272 p.

**Ege, V. (1939).** *A revision of the genus Anguilla Shaw: A systematic, phylogenetic and geographical study.* Bianco Luno A/S, Copenhagen.

**Eira, C., Vingada, J., Matos, J., & Beja, P. (2009).** *Using red fox (Vulpes vulpes) as bioindicators of heavy metal contamination in Portugal.* *Environmental Monitoring and Assessment*, 149, 387–395. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0217-z>

**El-Hilali, G. J. (2004).** *Réflexion autour de la didactique de la ponctuation au collège : entre les textes officiels et les pratiques effectives (Mémoire de maîtrise).* Université de Fès, Maroc. (source à vérifier selon contexte exact)

**Elie, P. (1979).** *La croissance de l'anguille européenne dans le marais de Brouage : description d'un modèle de croissance (Thèse de doctorat).* Université de Rennes I.

**Elie, P. (1994).** *Caractérisation des stades pigmentaires chez l'anguille (Anguilla anguilla L.) au cours de sa phase civelle.* *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 335, 81–98.

**Elie, P. (1999).** *Migration et dynamique de la population d'anguilles (Anguilla anguilla) dans l'estuaire de la Loire.* *Rapport CEMAGREF.* (Source à préciser selon ton document)

**Elie, P., & Daguzan, J. (1976).** *Premières données sur la croissance de l'anguille européenne (Anguilla anguilla L.) en baie de Vilaine.* *Science et Pêche*, 260, 1–8.

**Elie, P., & Fontenelle, G. (1982).** *La croissance de l'anguille (Anguilla anguilla L.) dans le marais breton-vendéen.* *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 286, 21–36.

**Elie, P., & Gérard, P. (2009).** *Effets des micropolluants et des organismes pathogènes chez l'Anguille européenne Anguilla anguilla L. 1758.* *Collection Étude CEMAGREF*, N° 128.

**Elie, P., & Rochard, E. (1994).** *Migration des civelles d'anguilles (Anguilla anguilla L.) dans les estuaires, modalités du phénomène et caractéristiques des individus.* *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 335, 81–98.

**Elie, P., Lecomte-Finiger, R., Cantrelle, R., & Charlon, N. (1982).** *Définition des limites des différents stades pigmentaires durant la phase civelle d'Anguilla anguilla.* *Vie et Milieu*, 32(3), 149–157.



**El-Oudiani, S., & Missaoui, H. (2013).** *Oil soluble vitamins and fatty acids profile of smoked European eel fillets.*

**Ennouri, N. (2012).** *Étude de la parasitofaune de l'anguille européenne (Anguilla anguilla L. 1758) dans la lagune de Ghar El Melh (Tunisie) (Thèse de Mastère). Université de Tunis El Manar.*

**Epler, P., & Bieniarz, K. (1978).** *Reproduction in the eel (Anguilla anguilla L.) under fishpond conditions. Aquaculture, 15, 181–188.*

**Es-Sounni, A., Klynne, M. A., Dutil, J. D., & Ali, M. A. (1987).** *Retinal cone movements in the yellow eel. Zoologischer Anzeiger, 219(5–6), 377–381.*

**Esteve, C., & Alcaide, E. (2009).** *Influence of nutritional and environmental factors on the European eel *Anguilla anguilla* immune response. Fish & Shellfish Immunology, 26(5), 743–747.*  
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2009.02.011>

## **F**

**Facey, D. E., & LaBar, G. W. (1981).** *Biology of the American eels in Lake Champlain, Vermont. Transactions of the American Fisheries Society, 110, 396–402.*

**Facey, D. E., & Van Den Avyle, M. J. (1987).** *Species profiles: life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates (North Atlantic) – American eel. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report, 82(11.74). U.S. Army Corps of Engineers, TR EL-82-4, 28 p.*

**Fahay, M. P. (1978).** *Biological and fisheries data on American eel *Anguilla rostrata* LeSueur. NOAA Technical Series Report No. 17, U.S. National Marine Fisheries Service, Sandy Hook Laboratory, 82 p.*

**Fahay, M. P. (1978).** *Biological and fisheries data on American eel, *Anguilla rostrata* LeSueur. U.S. National Marine Fisheries Center, Sandy Hook Laboratory, New Jersey, NOAA Technical Series Report No. 17, 82 p.*

**FAO. (1977).** *Synopsis of biological data on the eel *Anguilla anguilla*. FAO Fisheries Synopsis No. 80(1), 1–73. Rome: FAO.*

**FAO. (2008).** *The State of World Fisheries and Aquaculture 2008. Rome: FAO.*



**FAO. (2014).** *The State of World Fisheries and Aquaculture 2014.* Rome: FAO.

**FAO. (2015).** *The State of Food Insecurity in the World 2015: Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress.* Rome: FAO.  
<https://www.fao.org/publications/sofi/2015/en/>

**Farrugio, H., & Elie, P. (2007).** *L'anguille européenne: gestion, évaluation et perspectives.* Rapport Ifremer-CEMAGREF, 32 p. (source institutionnelle, lien requis si publié)

**Farrugio, H., Elie, P., & Fontenelle, G. (2010).** *Mise au point sur les stratégies de conservation de l'anguille européenne.* *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 378–379, 23–38.

**Fazio, G. (2007).** *Épidémiologie et biologie du parasite invasif *Anguillicola crassus* (Nematoda) et son impact sur la physiologie de son hôte, l'anguille européenne, *Anguilla anguilla* (Thèse de doctorat).* Université de Perpignan, France, 310 p.

**Fazio, G. (2009).** *Épidémiologie et biologie du parasite invasif *Anguillicola crassus* (Nematoda) et son impact sur la physiologie de son hôte, l'anguille européenne, *Anguilla anguilla* (Thèse de doctorat).* Université de Perpignan, France.

**Fazio, G., Lecomte-Finiger, R., Bartrina, J., Moné, H., & Pascal, P. (2005).** *Macroparasite community and asymmetry of the yellow eel *Anguilla anguilla* in Salses-Leucate lagoon, Southern France.* *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, 378–379, 99–113.

**Fazio, G., Sasal, P., Mouahid, G., Lecomte-Finiger, R., & Moné, H. (2012).** *Swimbladder nematodes (*Anguillicoloides crassus*) disturb silvering in European eels (*Anguilla anguilla*).* *Journal of Parasitology*, 98, 695–705.

**Feunteun, E. (2002).** *Management and restoration of European eel population (*Anguilla anguilla*): An impossible bargain.* *Ecological Engineering*, 18(5), 575–591.

**Folkvord, A., & Mosegaard, H. (2002).** *Croissance et analyse de la croissance.* In **Panfili, J., de Pontual, H., Troadec, H., & Wright, P. J. (Eds.),** *Manuel de Sclérochronologie des poissons* (pp. 146–166). Co-édition Ifremer–IRD.

**Fontaine, M. (1936).** *Sur la reproduction des anguilles et l'origine des leptocéphales.* *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 202, 1366–1368.



**Fontaine, M. M., Bertrand, E., Lopez, E., & Callamand, O. (1964).** Sur la maturation des organes génitaux de l'anguille femelle (*Anguilla anguilla* L.) et l'émission spontanée des œufs en aquarium. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, 295, 2907–2910.

**Fontaine, M., Delerue-Le Belle, N., Lallier, F., & Lopez, E. (1982).** Biologie générale. Toutes les anguilles succombent-elles après la reproduction et frayent-elles nécessairement en mer ? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série III*, 294, 809–811.

**Fontaine, Y. A. (1994).** L'argenture de l'anguille : métamorphose, anticipation, adaptation. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 335, 171–185.

**Fontenelle, G. (1991).** Âge et longueur des anguilles (*Anguilla anguilla*) en Europe : une revue critique. EIFAC. Eel Working Group, Dublin.

**Franceschini, R. et al. (2022).** Five-years management of an emerging parasite risk (*Eustrongylides* sp., Nematoda) in a fishery supply chain located on Trasimeno Lake (Italy). *Food Control*, 149, 109699.

**Freese, M., Rösch, R., & Palm, H. W. (2016).** Parasite load of the European eel (*Anguilla anguilla*) in Lake Constance. *Parasitology Research*, 115, 2249–2259. <https://doi.org/10.1007/s00436-016-4981-z>

**Freyhof, J., & Kottelat, M. (2010).** *Anguilla anguilla*. The IUCN Red List of Threatened Species 2010. <https://www.iucnredlist.org/species/60344/12363183>

**Friedland, K. D., Knights, B., & Miller, M. J. (2007).** Oceanic changes in the Sargasso Sea and declines in recruitment of the European eel. *ICES Journal of Marine Science*, 64(3), 519–530. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm022>

**Froese, R., & Pauly, D. (Eds.). (2015).** FishBase. <http://www.fishbase.org>

## G

**Gannouni, T., Zouiten, D., & Tlig-Zouari, S. (2008).** Contamination métallique chez *Anguilla anguilla* dans les lagunes tunisiennes. *Bulletin de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer*, 35, 55–62. (source universitaire à confirmer si disponible)



- Gargouri Ben Abdallah, L., & Maamouri, F. (2006).** Spatio-temporal dynamics of the nematode *Anguillicola crassus* in Northeast Tunisian lagoons. *Comptes Rendus de Biologie*, 329, 785–789.
- Gargouri-Ben Abdallah, L. (2001).** *Écologie parasitaire de l'anguille européenne dans les lagunes du Nord-Est tunisien (Thèse de Doctorat)*. Université de Tunis El Manar.
- Gascuel, D. (1986).** Modélisation de la croissance de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) dans les étangs littoraux méditerranéens. *Aquatic Living Resources*, 1, 23–34.
- Geeraerts, C., & Belpaire, C. (2010).** The effects of contaminants in European eel: A review. *Ecotoxicology*, 19, 239–266. <https://doi.org/10.1007/s10646-009-0424-0>
- Germain, L. (1927).** *Faune de France – Mollusques terrestres et fluviatiles*. Paris: Lechevalier.
- GFCM. (2012).** *Report of the 36th Session of the General Fisheries Commission for the Mediterranean*. FAO, Rome.
- Gharbi, H., Saidi, R., & Chakroun, H. (2019).** Heavy metal accumulation in eel tissues from Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 2521–2529. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3767-5>
- Gherib, A., & Lazli, A. (2017).** Étude histopathologique du foie chez *Anguilla anguilla* contaminée par des métaux lourds dans le lac Tonga. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 39, 91–99.
- Gilles, A., Elie, P., & Fontenelle, G. (2006).** Franchissement des barrages par les anguilles dans le bassin de la Vilaine. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 381, 1–13.
- Girard, P., & Elie, P. (2007).** *Manuel d'identification des principales lésions anatomomorphologiques et des principaux parasites externes des anguilles*. CEMAGREF / Association Santé Poissons Sauvages, 67 p.
- GNA (Groupe National Anguille). (1984).** *Propositions pour la gestion de l'anguille en France. Rapport technique*. Ministère de l'Agriculture.
- Godfrey, H. (1951).** A report on the eel investigations for 1950–51. Fisheries Research Board of Canada, Manuscript Reports of the Biological Stations No. 439, 38 p.
- Goeze, J. A. E. (1782).** *Versuch einer Naturgeschichte der Eingeweidewürmer thierischer Körper (Vol. 1)*. Gedruckt bey Philipp Pape, Fürstl. privilegirtem Buchdrucker.



**Götze, T., Cucherousset, J., & Olden, J. D. (2014).** *Global spread of non-native fishes: The need for a new research agenda. Fish and Fisheries, 15(3), 1–14.*

**Gross, M. R. (1987).** *Evolution of diadromy in fishes. American Fisheries Society Symposium, 1, 14–25.*

**Gussev, A. V. (1965).** *Monogenetic trematodes of freshwater fishes. Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences, Leningrad. (en russe, traduit dans d'autres travaux)*

## H

**Haenen, O. L. M., Bogaardt, M. J., & van Ginneken, V. J. T. (2010).** *Detection of Herpesvirus anguillae (HVA) in wild European eels (Anguilla anguilla) in the Netherlands. Fish Pathology, 45(2), 137–139.*

**Harden Jones, F. R. (1968).** *Fish Migration. London: Edward Arnold.*

**Has-Schön, E., Bogut, I., & Rajkovic, V. (2008).** *Heavy metal profile in five fish species included in human diet, from the Neretva River (Bosnia and Herzegovina). Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 54(1), 75–83.*

**Helfman, G. S. (1986).** *Diel distribution and activity of American eels (Anguilla rostrata) in a cave-spring. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 43, 1595–1605.*

**Helfman, G. S. (1995).** *Spinning for their supper. Natural History, 104(5), 26–29.*

**Helfman, G. S., & Bozeman, E. L. (1984a).** *Size, age, and sex of American eels in a Georgia river. Transactions of the American Fisheries Society, 113, 132–141.*

**Helfman, G. S., Facey, D. E., Hales Jr., L. S., & Bozeman Jr., E. L. (1987).** *Reproductive ecology of the American eel. American Fisheries Society Symposium, 1, 42–56.*

**Herranz-Jusdado, J. G., Cal, R. M., & Ruiz de Gauna, M. (2019).** *Tracking European eel migration using acoustic telemetry. Journal of Fish Biology, 95(5), 1200–1206.*

**Hizem, A. (2003).** *Écotoxicologie de l'anguille européenne dans les lagunes tunisiennes (Thèse de Doctorat). Université de Sfax.*

**Hulet, W. H., & Robins, C. R. (1989).** *The evolutionary significance of the leptocephalus larva.*



In **Böhlke, E. B.** (Ed.), *Fishes of the Western North Atlantic* (Vol. 2, pp. 669–677). Sears Foundation for Marine Research, New Haven.

**Hussain, R., Javed, M., & Zahoor, Y.** (2018). Bioaccumulation and risk assessment of heavy metals in fish tissues from Chenab River, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 12368–12374.

## **I**

**ICES (1999).** *Report of the ICES Advisory Committee on Fisheries Management, 1999. ICES Cooperative Research Report No. 229.*

**ICES (2001, 2004, 2006).** *Joint EIFAC/ICES Working Group on Eels (WGEEL). Annual reports. Copenhagen: ICES. (consultables sur <https://ices.dk>)*

**ICES (2002).** *Report of the ICES/EIFAC Working Group on Eels. ICES C.M. 2002/ACFM:03.*

**ICES (2007).** *Report of the Joint EIFAC/ICES Working Group on Eels (WGEEL), 3–7 September 2007, Bordeaux, France. ICES CM 2007/ACFM:23, 534 p.*

**ICES (2008).** *Report of the Joint EIFAC/ICES Working Group on Eels. ICES CM 2008/ACFM:15.*

**ICES (2011).** *ICES Advice 2011, Book 9: Widely distributed and migratory stocks. <https://www.ices.dk>*

**ICES (2012).** *European eel advice. ICES Advice 2012, Book 9.*

**ICES (2014).** *Advice for European eel. ICES Advice 2014, Book 9.*

**ICES WGEEL (2013a).** *Advice for 2014 – Widely distributed and migratory stocks – European eel (November 2013).*

**ICES WGEEL (2013b).** *Report of the Joint EIFAAC/ICES Working Group on Eels (WGEEL) (March).*

**Imbert, H., Durif, C., & Elie, P.** (2010). Movement patterns of silver eels in an obstructed river system. *Ecology of Freshwater Fish*, 19(1), 100–111.

**Inoue, J. G., Miya, M., Miller, M. J., Sado, T., Hanel, R., Hatooka, K., Aoyama, J., Minegishi,**



**M., Nishida, M., & Tsukamoto, K. (2010).** *Deep-ocean origin of the freshwater eels. Biology Letters*, 6, 363–366.

**Ivey, F. D., Hodge, P. N., Turner, G. E., & Borkovich, K. A. (1996).** *The G alpha i homologue gna-1 controls multiple differentiation pathways in Neurospora crassa. Molecular Biology of the Cell*, 7(8), 1283–1297.

## J

**Jackman, S., Tahk, A., Zeileis, A., Maimone, C., Fearon, J., Meers, Z., ... & Imports, M. A. S. S. (2015).** *Package 'pscl'. Political Science Computational Laboratory*, 18(04.2017).

**Jacoby, D., & Gollock, M. (2014).** *Anguilla anguilla. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.2.* <http://www.iucnredlist.org/details/60344/0>

**Jakob, E., Möller, K., Frankowski, J., & Knopf, K. (2009b).** *Parasite fauna of European eel in German waters. Journal of Helminthology*, 83(4), 361–371.

**Jankovská, I., Moravec, F., & Baruš, V. (2017).** *Helminth parasites of European eel (Anguilla anguilla) in the Czech Republic. Helminthologia*, 54(1), 70–76.

**Jarno-El Hilali, G. (2014).** *Un dispositif d'enseignement de la ponctuation pour apprendre à mieux écrire. Le Français Aujourd'hui*, 187(4), 101–113.

**Jegstrup, I. M., & Rosenkilde, P. (2003).** *The role of hormones in silvering of the European eel: Regulation by thyroxine and cortisone. Fish Physiology and Biochemistry*, 28(1–4), 389–390.

**Jellyman, J. (1989).** *Diet of two species of freshwater eel (Anguilla spp.) in Lake Pounui, New Zealand. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 23, 1–10.

**Jenkins, R. E., & Jenkins, D. J. (1980).** *Reproductive behavior of the Greater redhorse, Moxostoma valenciennesi, in the Thousand Islands Region. Canadian Field-Naturalist*, 94(4), 426–430.

**Justine, J. L. (1998).** *Non-monophyly of the monogeneans? International Journal of Parasitology*, 28, 1653–1657.

**Juszcak, R., Pawlak, J., & Trawiński, T. (2015).** *Morphological variation in the European eel*



(*Anguilla anguilla*) population in Polish waters. *Archives of Polish Fisheries*, 23(4), 245–254.  
<https://doi.org/10.1515/aopf-2015-0020>

## K

**Kaneko, T., Hasegawa, S., & Sasai, S. (2003).** Chloride cells in the Japanese eel during their early life stages and downstream migration. In **Aida, K., Tsukamoto, K., & Yamauchi, K. (Eds.),** *Eel Biology* (pp. 457–468). Springer, Tokyo.

**Kara, M. H. (2012).** *Poissons des eaux continentales d'Algérie*. Alger : Publications de l'Université Badji Mokhtar.

**Kennedy, C. R. (2007).** The pathogenic helminth parasites of eels. *Journal of Fish Diseases*, 30(5), 319–334. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2007.00822.x>

**Kennedy, C. R., & Di Cave, D. (1998a).** *Gyrodactylus anguillae* (Monogenea): The story of an appearance and a disappearance. *Folia Parasitologica*, 45, 77–78.

**Kennedy, C. R., & Fitch, D. J. (1990).** Colonization, larval survival and epidemiology of *Anguillicola crassus* in eels in Britain. *Journal of Fish Biology*, 36(1), 117–131.  
<https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1990.tb05929.x>

**Kennedy, C. R., Berrilli, F., Di Cave, D., De Liberato, C., & Orecchia, P. (1998b).** Composition and diversity of helminth communities in eels *Anguilla anguilla* in the river Tiber: Long-term changes and comparison with insular Europe. *Journal of Helminthology*, 72, 301–306.

**Kennedy, C. R., Di Cave, D., Berrilli, F., & Orecchia, P. (1997).** Composition and structure of helminth communities in eels *Anguilla anguilla* from Italian coastal lagoons. *Journal of Helminthology*, 71, 35–40.

**Kettle, A. J., Bakker, D. C. E., & Haines, K. (2011).** Modelling the dispersal of European eel larvae from the Sargasso Sea. *Fisheries Oceanography*, 20(4), 322–337.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2011.00584.x>

**Kirk, R. S. (2003).** The impact of *Anguillicola crassus* on European eel (*Anguilla anguilla*) populations. *Fisheries Management and Ecology*, 10(6), 385–394.



**Kirk, R. S., Lewis, J. W., & Kennedy, C. R. (2002).** *Effects of temperature and salinity on excystment of metacercariae of Diplostomum spathaceum.* *Parasitology*, 124(3), 321–328.

**Kleckner, R. C., & McCleave, J. D. (1985).** *Spatial and temporal distribution of American eel larvae in relation to North Atlantic Ocean current system.* *Dana*, 4, 67–92.

**Kleckner, R. C., & McCleave, J. D. (1988).** *The northern limit of spawning by Atlantic eels (Anguilla) in the Sargasso Sea in relation to thermal fronts and surface water masses.* *Journal of Marine Research*, 46(3), 647–667.

**Kljaković-Gašpić, Z., Vrgoč, N., Odžak, N., Ujević, I., & Baršić, J. (2023).** *Trace metals in edible tissues of European eel (Anguilla anguilla) from the Adriatic Sea.* *Marine Pollution Bulletin*, 188, 114654. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114654>

**Knöesche, R. (2003).** *Improvements in eel aquaculture and disease control.* In: EIFAC/ICES Working Group on Eel (WGEEL), Report 2003. ICES, Copenhagen. (source institutionnelle à confirmer pour la citation complète)

**Koie, M. (1988a).** *Parasites in European eels, Anguilla anguilla (L.) from Danish freshwater, brackish and marine localities.* *Ophelia*, 29, 93–118.

**Kushnirov, V. V., & Degani, G. (1995).** *Sexual dimorphism in the European eel Anguilla anguilla.* *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 112(2), 315–318.

**Kawahara, A., Niimi, T., & Itagaki, H. (1974).** *Observations on Anguillicola crassus (Nematoda: Dracunculoidea) parasitic in the air bladder of the eel.* *Japanese Journal of Parasitology*, 23, 275–278.

## L

**Ladjama, I. (2016).** *Facteurs environnementaux et qualités organoleptiques des anguilles du complexe des zones humides du PNEK (Doctoral dissertation, Badji Mokhtar University, Annaba).*

**Laffaille, P., Acou, A., Legault, A., & Feunteun, E. (2004).** *Temporal changes in European eel Anguilla anguilla stock in a small catchment after installation of fish passes.* *Fisheries Management and Ecology*, 11, 131–138.



- Lammens, E. H. R. R., & Visser, J. T. (1989).** *Variability of mouth width in European eel, *Anguilla anguilla*, in relation to varying feeding conditions in three Dutch lakes. *Environmental Biology of Fishes*, 26, 63–75.*
- Larsson, L., & Lewander, K. (1973).** *Metabolic effects of starvation in the eel, *Anguilla anguilla* L. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 44(2), 367–374.*
- Larsson, P., Hamrin, S., & Okla, L. (1990).** *Fat content as a factor inducing migratory behavior in the eel (*Anguilla anguilla*) to the Sargasso Sea. *Naturwissenschaften*, 77, 488–490.*
- Lary, S. J., & Busch, W. D. N. (1997).** *American eel (*Anguilla rostrata*) in Lake Ontario and its tributaries: Distribution, abundance, essential habitat and restoration requirements. U.S. Fish and Wildlife Service, Amherst, NY, 27 p.*
- Lazli, A., Bensouilah, M., & Benajiba, M. H. (2011).** *Contamination métallique chez *Anguilla anguilla* du lac Tonga (Algérie). *Revue d'Ecologie*, 66, 105–115.*
- Lazli, A., Gherib, A., & Bensouilah, M. (2012).** *Effet des métaux lourds sur les tissus hépatiques chez l'anguille européenne du lac Tonga. *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 137(1–4), 41–48.*
- Lazli, A., Gherib, A., & Bensouilah, M. (2014).** *Bioaccumulation et effets toxiques du plomb chez *Anguilla anguilla*. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 2, 7–12.*
- Lecomte-Finiger, R. (1985).** *L'âge de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L., 1758): état actuel des connaissances et recherches nouvelles en Méditerranée. *Journal of Applied Ichthyology*, 1, 178–192.*
- Lecomte-Finiger, R. (1990).** *Métamorphose de l'anguille jaune en anguille argentée *Anguilla anguilla* L. et sa migration catadrome. *Annales de Biologie*, 29, 183–194.*
- Lecomte-Finiger, R., Maunier, C., & Khafif, M. (2004).** *Les larves leptocéphales, ces méconnues. *Cybium*, 28(2), 83–95.*
- Lefebvre, F., Acou, A., & Crivelli, A. J. (2004).** *Movement patterns of silver eels in a Mediterranean coastal lagoon. *Journal of Fish Biology*, 64(5), 1370–1381.*
- Lefebvre, F., Acou, A., & Crivelli, A. J. (2012).** *Silvering and downstream migration of eels in*



*Mediterranean wetlands. Hydrobiologia*, 686(1), 23–36.

**Lefebvre, F., Acou, A., Poizat, G., & Crivelli, A. J. (2002b).** *Influence of environmental variables on migration of silver eels in a large Mediterranean catchment. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 364 suppl., 95–110.

**Lefebvre, F., Contournet, P., & Crivelli, A. J. (2011).** *Eel management in Mediterranean lagoons. Fisheries Management and Ecology*, 18(4), 305–312.

**Lefebvre, F., Fatin, D., & Bardonnnet, A. (2007).** *Management of eel escapement in the Atlantic coastal wetlands of France. ICES Journal of Marine Science*, 64, 1477–1483.

**Lefebvre, F., Fournier, J., & Crivelli, A. J. (2002a).** *Spawning migration of *Anguilla anguilla* silver eels in a Mediterranean coastal lagoon: the impact of obstacles. Ecology of Freshwater Fish*, 11, 234–241.

**Lefebvre, F., Fournier, J., & Crivelli, A. J. (2003).** *Impact of obstacles on the downstream migration of European eels. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 370–371, 119–131.

**Lenth, R., & Lenth, M. R. (2018).** *Package ‘lsmeans’. The American Statistician*, 34(4), 216–221.

**Lewander, K., Larsson, A., & Johansson-Sjöbeck, M. L. (1974).** *Metabolic effects of starvation in the European eel (*Anguilla anguilla* L.). Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 47(1), 91–102.

**Liew, P. K. L. (1982).** *Impact of the eel ladder on the upstream migrating eels (*Anguilla rostrata*) population in the St. Lawrence River at Cornwall: 1974–1978. In Loftus, K. H. (Ed.), Proceedings of the 1980 North American Eel Conference (pp. 17–22). Ontario Ministry of Natural Resources.*

**Linde, A. R., Sanz-Lázaro, C., & Garcia-Vazquez, E. (2004).** *Heavy metal contamination in eels (*Anguilla anguilla*) from Asturias, Spain. Ecotoxicology and Environmental Safety*, 59(1), 60–66.

**Linnaeus, C. (1758).** *Systema Naturae (10e éd., Vol. 1). Holmiae: Laurentii Salvii.*

**Linné, C. (1758).** *Systema Naturae per Regna Tria Naturae. Stockholm: Laurentii Salvii.*

**Lookabaugh, P. S., & Angermeier, P. L. (1992).** *Diet patterns of American eel, *Anguilla rostrata*,*



in the James River Drainage, Virginia. *Journal of Freshwater Ecology*, 7(4), 425–431.

**Lortholary, F., Le Dû-Blayo, L., & Boisneau, C. (2019).** *Évolution de l'anguille européenne dans les milieux aquatiques continentaux : état et perspectives. Cahiers Naturalistes*, 73, 25–39.

**Loucif, N., Meddour, A., & Samraoui, B. (2009).** *Biodiversité des parasites chez Anguilla anguilla Linnaeus, 1758 dans le Parc National d'El Kala — Algérie. European Journal of Scientific Research*, 2, 300–309.

**Luczyńska, J., Paszczyk, B., & Kruszewski, S. (2023).** *Evaluation of heavy metal contamination in eel tissues and risk for human consumption. Environmental Science and Pollution Research*, 30, 20678–20687. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25785-3>

## M

**Machta, L. (2001).** *The outlook for global climate change. Transactions of the New York Academy of Sciences*, 63(4), 566–570.

**MacLeod, L. (1952).** *The migration of the silver eel (Anguilla anguilla L.). Scottish Home Department, Freshwater Fisheries Laboratory, Report No. 3.*

**Maes, G. E., & Volckaert, F. A. M. (2002).** *Clinal genetic variation and isolation by distance in the European eel (Anguilla anguilla L.). Biological Journal of the Linnean Society*, 77(4), 509–521.

**Maes, G. E., Volckaert, F. A. M., & Berrebi, P. (2008).** *Evidence for population structure and local adaptation in the European eel (Anguilla anguilla). Marine Ecology Progress Series*, 372, 253–264. <https://doi.org/10.3354/meps07745>

**Maillo, P. A., Salvado, H., Gracia, M. P., & Marques, A. (2000).** *Parasite fauna on the European eel, Anguilla anguilla L., 1758, in the Natural Park of the Ebro Delta, West Mediterranean. 38e meeting annuel du groupement des protistologues de langue française, Paris, France.*

**Marchelidon, J., The Belle, N., Hardy, A., Vidal, B., Sbaihi, M., Burzawa-Gerard, E., Schmitz, M., & Dufour, S. (1999).** *Étude des variations de paramètres anatomiques et endocriniens chez l'anguille européenne (Anguilla anguilla) femelle, sédentaire et d'avalaison : Application à la caractérisation du stade argenté. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 355, 349–



368.

**Marcus, N. H. (1990).** *Calanoid copepod, cladoceran, and rotifer eggs in sea-bottom sediments of Northern California coastal waters: Identification, occurrence and hatching. Marine Biology, 105, 413–418.*

**McCleave, J. D. (1993).** *Physical and behavioral controls on the oceanic distribution and migration of leptocephali. Journal of Fish Biology, 43(Suppl. A), 243–273.*

**McCleave, J. D., & Kleckner, R. C. (1982).** *Selective tidal stream transport in the estuarine migration of glass eels of the American eel (Anguilla rostrata). Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 62(1), 149–157.*

**McCleave, J. D., & Kleckner, R. C. (1987).** *Distribution and behavior of leptocephali of the American eel (Anguilla rostrata) and the European eel (A. anguilla) in the Sargasso Sea. American Fisheries Society Symposium, 1, 242–252.*

**McCleave, J. D., Kleckner, R. C., & Castonguay, M. (1987).** *Reproductive sympatry of American and European eels and implications for migration and taxonomy. American Fisheries Society Symposium, 1, 286–297.*

**McCord, J. W. (1977).** *Food habits and elver migration of American eel, Anguilla rostrata (LeSueur), in Cooper River, South Carolina (Master's thesis). Clemson University, Clemson, SC, 47 p.*

**McGuire, S. (2015).** *FAO, IFAD, and WFP. The state of food insecurity in the world 2015: Meeting the 2015 international hunger targets: Taking stock of uneven progress. Advances in Nutrition, 6(5), 623–624.*

**Measures, L. N. (1988).** *The development of Eustrongylides tubifex (Nematoda: Dioctophymatoidea) in oligochaetes. The Journal of parasitology, 294-304..*

**Mecif, K., Ramdani, M., Mezghani, A., & Boumaïza, M. (2020).** *Étude des parasites intestinaux de l'anguille européenne dans le lac Oubeïra (Algérie). Bulletin de la Société Zoologique de France, 145(2), 135–144.*



- Mehanna, S. F., & Farouk, A. E. (2021).** Length–weight relationship of 60 fish species from the Eastern Mediterranean Sea, Egypt (GFCM–GSA 26). *Frontiers in Marine Science*, 8, 625422.
- Melià, P., Bevacqua, D., Crivelli, A. J., De Leo, G. A., Gatto, M., & Panfili, J. (2013).** Integrating field data into individual-based models of growth and movement for European eel (*Anguilla anguilla*) in Mediterranean coastal lagoons. *Ecological Modelling*, 251, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.11.002>
- Melià, P., Bevacqua, D., Crivelli, A. J., De Leo, G. A., Panfili, J., & Gatto, M. (2006).** Age and growth of *Anguilla anguilla* in the Camargue lagoons. *Journal of Fish Biology*, 68, 876–890.
- Meunier, F. J. (1994).** La microstructure des otolithes : une clef pour l'étude de la croissance et de l'âge des poissons. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 332, 55–62.
- Miao, W., Xiao, Y., Deng, H., & Chen, Z. (2020).** Heavy metals in eels from the Yangtze River estuary: Distribution and risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12319–12330.
- Miller, M. J., & McCleave, J. D. (1994).** Species assemblages of leptocephali in the western Sargasso Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 101(1–2), 1–11.
- Mizelle, J. D. (1938).** Comparative studies on trematodes (*Gyrodactyloidea*) from the gills of North American freshwater fishes. *Biological Monographs*, 17, 1–81.
- Monein-Langle, C. (1985).** Étude de l'anguille européenne dans les étangs de Camargue. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II.
- Monticini, P. (2014).** Technical guidelines for aquaculture development of eels in the Mediterranean region. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1091*.
- Moravec, F. (2006).** *Dracunculoid and anguillicoloid nematodes parasitic in fishes*. Prague : Academia, 636 p.
- Moravec, F., & Skoríková, B. (1998).** *Anguillicoloides crassus* (Nematoda: Anguillicolidae) : a review. *Folia Parasitologica*, 45(1), 1–14.
- Moravec, F. (2013).** *Parasitic nematodes of freshwater fishes of Europe Revised*. In *Akademie Věd České Republiky (1st ed.)* Available at: <https://www.bu.uni.wroc.pl/en/news->



*bulletin/publications/parasitic-nematodes-freshwater-fishes-europe.*

**Moriarty, C. (1987).** *Factors influencing recruitment of the Atlantic species of anguillid eels. American Fisheries Society Symposium, 1, 483–491.*

**Moriarty, C., & Dekker, W. (1997).** *Management of the eel. Fisheries Bulletin Dublin, 15, 110 p.*

**Morrison, W. E., & Secor, D. H. (2003).** *Demographic attributes of yellow-phase American eels (Anguilla rostrata) in Chesapeake Bay, USA. Marine Ecology Progress Series, 270, 253–262.*

**Murai, T. (1979).** *Digestive enzymes in the intestine of carp and eels. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 45(2), 169–175.*

## N

**Near, T. J., Page, L. M., & Mayden, R. L. (1998).** *Phylogenetic relationships of Percid fishes as inferred from mitochondrial cytochrome b DNA sequence data. Molecular Phylogenetics and Evolution, 10(3), 343–353.*

**Ngugi, C. C., Oyoo-Okoth, E., & Manyala, J. O. (2017).** *Trace metal levels in fish from Lake Victoria. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies, 5(3), 221–227.*

**Nielsen, P., & Prouzet, P. (2008).** *Migration des anguilles argentées dans les cours d'eau de la façade atlantique française. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 388, 43–64.*

**Nordmann, A. von. (1832).** *Mikrographische Beiträge zur Naturgeschichte der wirbellosen Thiere. Berlin: Gebrüder Reimer.*

**Nyman, L. (1972).** *Some effects of temperature on eel (Anguilla) behavior. Report of the Institute of Freshwater Research Drottningholm, 52, 90–102.*

## O

**O'Connor, J. F. (1971).** *Ecology of brook trout, American smelt and American eel in two lakes in the Matamek River system, Quebec (Master's thesis). University of Waterloo, Ontario, 84 p.*

**Odhner, T. (1912).** *Zum natürlichen System der digenen Trematoden. Zoologischer Anzeiger, 39, 147–150.*



**Office National de la Météorologie (ONM). (2021).** *Rapport climatique annuel. Algérie.*

**Ogawa, K. (1986).** *Infection dynamics of Anguillicola crassus in eels. Fish Pathology, 21, 213–219.*

**Ogawa, K., & Egusa, S. (1976).** *Researches on Anguillicola crassus, a parasitic nematode in the air bladder of the eel. Fish Pathology, 10, 201–206.*

**Ogden, J. C. (1970).** *Relative abundance, food habits, and age of the American eel, Anguilla rostrata (LeSueur), in certain New Jersey streams. Transactions of the American Fisheries Society, 99, 54–59.*

**Otake, T., Ishii, T., Doi, T., & Tsukamoto, K. (1993).** *Otolith microstructure of leptocephali: a clue to estimating age and hatching season. Bulletin of Marine Science, 52(1), 124–132.*

**Ould Daddah, B. (1995).** *L'exploitation halieutique et l'aménagement des ressources dans la région du Banc d'Arguin. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale.*

**Ounissi, M. (2007).** *Bioaccumulation de certains métaux lourds chez Anguilla anguilla dans la région de Skikda. Revue des Sciences de l'Environnement, 8, 51–60.*

## P

**Pacariz, S., Westerberg, H., & Björk, G. (2014).** *Climate change and passive transport of European eel larvae. Ecology of Freshwater Fish, 23, 86–94.*

**Palstra, A. P., Antonissen, E., Lenderink, E., van den Thillart, G. E. E. J. M., & Murk, A. J. (2007).** *Estrogenic exposure inhibits freshwater eels' reproductive development and swimming behavior. Environmental Science & Technology, 41(15), 5125–5131.*

**Palstra, A. P., Van Ginneken, V. J. T., Murk, A. J., & Van Den Thillart, G. E. E. J. M. (2006).** *Are dioxin-like contaminants responsible for the eel (Anguilla anguilla) drama? ICES CM 2006/J:*



34 (*Is there more to eels than SLIME?*), 5 p.

**Palstra, A. P., van Ginneken, V. J. T., Murk, A. J., & van den Thillart, G. E. E. J. M. (2010).** *Are dioxin-like contaminants responsible for the eel (*Anguilla anguilla*) drama? Naturwissenschaften*, 97(3), 301–311.

**Panfili, J., de Pontual, H., Troadec, H., & Wright, P. J. (Eds.). (2002).** *Manuel de sclérochronologie des poissons. Coédition Ifremer–IRD*, 464 p.

**Panfili, J., de Pontual, H., Troadec, H., & Wright, P. J. (Eds.). (2002).** *Manuel de sclérochronologie des poissons. Coédition Ifremer–IRD*, 464 p.

**Pankhurst, N. W. (1982a).** *Relation of visual changes to the onset of sexual maturation in the European eel, *Anguilla anguilla* L. Journal of Fish Biology*, 21, 417–428.

**Pankhurst, N. W. (1982b).** *Changes in the skin-scale complex with sexual maturation in the European eel, *Anguilla anguilla* (L.). Journal of Fish Biology*, 21, 549–561.

**Pankhurst, N. W., & Lythgoe, J. N. (1982).** *Structure and color of the integument of the European eel *Anguilla anguilla* L. Journal of Fish Biology*, 23, 229–240.

**Pankhurst, N. W., & Sorensen, P. W. (1984).** *Degeneration of the alimentary tract in sexually maturing European *Anguilla anguilla* (L.) and American eels *Anguilla rostrata* (Le Sueur). Canadian Journal of Zoology*, 62, 1143–1149.

**Pannetier, P., Candelier, F., Berail, S., Mottier, A., Meynier, L., & Le Bizec, B. (2016).** *Trace element fingerprinting in eels: a tool for provenance discrimination. Environmental Science & Technology*, 50(24), 13386–13395.

**Passakas, T., & Tesch, F. W. (1980).** *Karyological and gonadal sex of eels *Anguilla anguilla* in the German Bight and the lower River Elbe. Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 34, 159–164.

**Pérez-Ruzafa, Á., & Marcos, C. (2012).** *Fisheries in coastal lagoons: an assumed but poorly researched aspect of the ecology and functioning of coastal lagoons. Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 110, 15–31.



**Perlmutter, A. (1951).** *An aquarium experiment on the American eel as a predator on larval lampreys.* *Copeia*, 2, 173–174.

**Pierron, F., Baudrimont, M., Dufour, S., Elie, P., Bossy, A., Baloche, S., Mesmer-Dudons, N., Gonzalez, P., Bourdineaud, J. P., & Massabuau, J. C. (2008).** *How cadmium could compromise the completion of the European eel's reproductive migration.* *Environmental Science and Technology*, 42(12), 4607–4612.

**Pierron, F., Baudrimont, M., Lucia, M., Durrieu, G., Massabuau, J. C., & Elie, P. (2008).** *Cadmium uptake by the European eel: Trophic transfer in field and experimental investigations.* *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 70(1), 10–19.

**Pike, C., Crook, V., Gollock, M., Beaulaton, L., Belpaire, C., Dekker, W., ... & Hanel, R. (2020).** *Anguilla anguilla.* *The IUCN Red List of Threatened Species.*

**Piria, M., Jakšić, G., Treer, T., Safner, R., Aničić, I., & Tomljanović, T. (2014).** *Long-term changes in fish assemblages of the Sava River.* *Croatian Journal of Fisheries*, 72, 5–16.

**Powles, P. M., & Warlen, S. M. (2001).** *Recruitment patterns of American eels (*Anguilla rostrata*) to Prince Edward Island, Canada.* *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 364 suppl., 221–232.

**Proffitt, D. R., Kaiser, M. K., & Whelan, S. M. (1990).** *Understanding wheel dynamics.* *Cognitive Psychology*, 22(3), 342–373.

**Prouzet, P. (2003).** *Importance et évolution des captures d'anguilles (*Anguilla anguilla*) par les pêcheries côtières françaises.* *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 364 suppl., 167–180.

## R

**R Core Team (2023).** *R : un langage et un environnement pour le calcul statistique.* Fondation R pour le calcul statistique, Vienne, Autriche. Disponible sur : <https://www.R-project.org/>



**Raachi, A. (2007).** *Étude histopathologique chez Anguilla anguilla exposée à une pollution métallique au niveau de l'estuaire du Mafrag (Algérie). Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar – Annaba.*

**Rad, S. (2013).** *Étude parasitologique et toxicologique chez l'anguille (Anguilla anguilla) du lac Mellah. Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar – Annaba.*

**Rahhou, M., Faure, E., & Quignard, J. P. (2005).** *Fish diversity and ecology in the Sebou estuary (Morocco). Cybium, 29(3), 289–296.*

**Rahhou, M., Faure, E., & Trabelsi, M. (2011).** *Heavy metals bioaccumulation in eels from Moroccan estuaries. Environmental Monitoring and Assessment, 182(1–4), 239–253.*

**Richards, W. J. (1987).** *Early stages of Atlantic eels (Anguilla spp.) and their identification. NOAA Technical Report NMFS, 50, 21–38.*

**Ricker, W. E. (1973).** *Linear regression in fishery research. Journal of Fisheries Research Board of Canada, 3, 409–434.*

**Ringuet, S., Muto, F., & Raymakers, C. (2002).** *Eels: Their harvest and trade in Europe and Asia. TRAFFIC Bulletin, 19(2), 1–24.*

**Romero, M. R., Serrano, T., Faya, M., González, P., & Tarazona, J. V. (2020).** *Integrated environmental monitoring of contaminants in European eel (Anguilla anguilla). Environmental Pollution, 263, 114598.*

**Rudolphi, K. A. (1808).** *Entozoorum synopsis cui accedunt mantissa duplex et indices locupletissimi. Berlin: Sumtibus Augusti Rücker.*

**Rusconi, A., Prati, P., Bragoni, R., Castelli, M., Postiglione, U., Rigamonti, S., ... & Olivieri, E. (2022).** *Occurrence of Eustrongylides excisus (Nematoda: Dioctophymatidae) in European perch (Perca fluviatilis) and great cormorant (Phalacrocorax carbo) in Lake Annone, northern*



Italy. *The Journal of Parasitology*, 108(2), 209-216.

## S

**Saad, A. (2003).** *Contribution à l'étude écologique de l'anguille européenne (Anguilla anguilla) dans le lac Ichkeul. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar.*

**Sadler, K. (1979).** *Effects of temperature on the growth and survival of the European eel, Anguilla anguilla L. Journal of Fish Biology*, 15, 499–507.

**Saglio, P., Trijasse, S., & Delahaut, L. (1988).** *Effet de la pollution sur le comportement de l'anguille européenne (Anguilla anguilla). Acta Oecologica*, 9, 87–100.

**Samraoui, B., & de Bélair, G. (1997).** *Les zones humides d'Algérie : Bilan et perspectives. Ecologia Mediterranea*, 23(1–2), 11–22.

**Sanekli, M. (1981).** *Étude morphologique de l'anguille dans les eaux côtières tunisiennes. Mémoire de fin d'étude, Institut National Agronomique de Tunisie.*

**Sasai, S., Kaneko, T., & Tsukamoto, K. (2007).** *Ontogenic change of gill chloride cells in leptocephalus and glass eel stages of the Japanese eel, Anguilla japonica. Marine Biology*, 150, 487–496.

**Schabuss, M., Kennedy, C. R., Konecny, R., Grillitsch, B., Schiemer, F., & Herzig, A. (2005).** *Long-term investigation of the composition and richness of intestinal helminth communities in the stocked population of eel, Anguilla anguilla, in Neusiedler See, Austria. Parasitology*, 130, 185–194.

**Schmidt, J. (1909).** *On the distribution of fresh-water eels (Anguilla) throughout the world. I. Atlantic Ocean and adjacent regions. Meddelelser fra Kommissionen Havundersøgelser Serie Fiskeri*, 3(7), 1–45.

**Schmidt, J. (1909b).** *On the distribution of freshwater eels throughout the world. Meddelelser fra Kommissionen for Havundersøgelser: Serie Fiskeri*, 3(7), 1–45.



**Schmidt, J. (1922).** *The breeding places of the eel. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 211, 179–208.*

**Schmidt, J. (1922).** *The breeding places of the eel. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 211(382–390), 179–208. <https://doi.org/10.1098/rstb.1922.0005>*

**Schmidt, J. (1923).** *Breeding places and migrations of the eel. Nature, 111, 51–54.*

**Schmidt, J. (1924).** *The eel and its life history. Nature, 114, 370–372.*

**Schmidt, J. (1925).** *The breeding places of the eel. Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution, Report for 1924, 279–316.*

**Schmidt, J. (1935).** *Spawning area of the European eel. Nature, 135, 148.*

**Schoth, M., & Tesch, F. W. (1982).** *Spatial distribution of *Anguilla anguilla leptcephali* in the Sargasso Sea. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 35(3), 309–320.*

**Seridi, H. (2011).** *Contamination des anguilles par les métaux lourds dans les lagunes de l'Est algérien. Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar – Annaba.*

**Shiraishi, H., & Crook, V. (2015).** *Eel market dynamics: An analysis of *Anguilla* production, trade and consumption in East Asia. TRAFFIC Report, 76 p.*

**Sinha, V. R. P., & Jones, J. W. (1966).** *On the sex and distribution of the freshwater eel (*Anguilla anguilla*). Journal of Zoology, 150, 371–385.*

**Sinha, V. R. P., & Jones, J. W. (1967).** *On the age and growth of the freshwater eel (*Anguilla anguilla*). Journal of Zoology, 153, 99–117.*

**Sinha, V. R. P., & Jones, J. W. (1967).** *On the food of the freshwater eels and their feeding relationships with the salmonids. Journal of Zoology, 153, 119–137.*



**Sinha, V. R. P., & Jones, J. W. (1975).** *The European freshwater eel. Nature, 253, 353–356.*

**Sloane, R. D. (1984).** *Distribution, abundance, growth and food of freshwater eels (Anguilla spp.) in the Douglas River, Tasmania. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 35, 325–339.*

**Sola, C., & Tongiorgi, P. (1996).** *The effect of salinity on the orientation of glass eels (Anguilla anguilla) in a circular arena. Marine and Freshwater Behaviour and Physiology, 27, 205–211.*

**Sorensen, P. W. (1986).** *Origins of the freshwater attractant(s) of migrating elvers of the American eel, Anguilla rostrata. Environmental Biology of Fishes, 17, 185–200.*

**Sorensen, P. W., & Pankhurst, N. W. (1988).** *Histological changes in the gonad skin, intestine and olfactory epithelium of artificially-matured male American eels, Anguilla rostrata. Journal of Fish Biology, 32, 297–307.*

**Sures, B., Nachev, M., Selbach, C., & Marcogliese, D. J. (2001).** *Parasites as bioindicators of environmental pollution: An overview and examples. Parasitology, 123, S225–S245.*

**Svedäng, H., & Wickström, H. (1997).** *Low fat contents in female silver eels: indications of insufficient feeding? Journal of Fish Biology, 50(3), 475–486.*

**Svedäng, H., Neuman, E., & Wickstrom, H. (1996).** *Maturation patterns in female European eel: Age and size at the silver eel stage. Journal of Fish Biology, 48, 342–351.*

**Szekely, C., Lang, T., & Molnar, K. (2008).** *External and internal parasites of eels in the Lake Balaton and its inflows. Acta Veterinaria Hungarica, 56(4), 447–457.*

## **T**

**Tabouret, H., Bareille, G., Mestrot, A., Caill-Milly, N., Budzinski, H., Peluhet, L., Prouzet, P., & Donard, O. F. X. (2011).** *Heavy metals and organochlorinated compounds in the European eel (Anguilla anguilla) from the Adour estuary and associated wetlands (France). Journal of Environmental Monitoring, 13(5), 1446–1456.*



**Tahri, M. (2009).** *Les parasites de l'anguille européenne Anguilla anguilla peuplant l'estuaire du Mafrag (Mémoire de Magistère). Université Badji Mokhtar, Annaba, 122 p.*

**Tahri, M. (2016).** *Ecobiologie de l'anguille européenne Anguilla anguilla peuplant le lac Oubeira (Parc National d'el Kala) (Doctoral dissertation, Thèse de 3ème Cycle, Univ. Badji Mokhtar, Annaba).*

**Tahri, M., & Bensouilah, M. (2016).** *Étude parasitologique et écotoxicologique de l'anguille européenne (Anguilla anguilla) dans l'estuaire du Mafragh (Algérie). African Journal of Environment and Natural Science Research, 1(1), 1–14.*

**Tahri, M., & Panfili, J. (2023).** *13-year population survey of the critically endangered European eel in the southern Mediterranean region (Algeria). Journal of Fish Biology, 102(6), 1492-1502.*

**Tapie, N., Le Menach, K., Pasquaud, S., Elie, P., Devier, M. H., & Budzinski, H. (2011).** *PBDE and PCB contamination of eels from the Gironde estuary: From glass eels to silver eels. Chemosphere, 83(2), 175–185.*

**Ternengo, S., Levron, C., Desideri, F., & Marchand, B. (2005).** *Parasite communities in European eels Anguilla anguilla (Pisces, Teleostei) from a Corsican coastal pond. Vie et Milieu, 55(1), 1–6.*

**Tesch, F. W. (1971).** *Les anguilles : biologie et exploitation. Paris : Gauthier-Villars.*

**Tesch, F. W. (1977).** *The eel. Biology and management of anguillid eels. London : Chapman & Hall, 434 p.*

**Tesch, F. W. (1977).** *The eel: biology and management of anguillid eels. Chapman and Hall, London, 434 p.*

**Tesch, F. W. (1982).** *Aspects of eel biology in relation to management. FAO Fisheries Technical Paper, 200, 3–11.*



**Tesch, F. W. (1991).** *Anguillidae*. In **Hoestlandt, H. (Ed.)**, *The freshwater fishes of Europe* (Vol. 2, pp. 388–437). AULA-Verlag, Wiesbaden, Germany, 447 p.

**Tesch, F. W. (1993).** *The Eel* (5th ed.). Thorpe, J. E., Oxford, UK: Blackwell Science.

**Tesch, F. W. (2003).** *The Eel* (5th ed.). In **Thorpe, J. E.** Oxford, UK.

**Tesch, F. W., & Wegner, G. (1990).** *Development and aspects of silvering in European eel (Anguilla anguilla) and American eel (Anguilla rostrata)*. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 316, 147–155.

**Thornton, K. W., Kennedy, V. S., Magnum, W. R., & McCabe, G. T. (1980).** *Ecological effects of power plant entrainment on fish populations*. *Transactions of the American Fisheries Society*, 109(4), 486–498.

**Todd, P. R. (1981).** *Timing and periodicity of migrating New Zealand freshwater eels (Anguilla spp.)*. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 15, 225–235.

**Tsukamoto, K., Nakagawa, H., & Tesch, F. W. (2002).** *Oceanic spawning migration of the Japanese eel*. In K. Aida, K. Tsukamoto & K. Yamauchi (Eds.), *Eel Biology* (pp. 275–292). Tokyo : Springer-Verlag.

**Tsukamoto, K., Otake, T., Mochioka, N., Lee, T. W., Fricke, H., & Kimura, S. (1998).** *The spawning site of the Japanese eel (Anguilla japonica)*. *Nature*, 396(6706), 333–336.

**Tzeng, W. N., & Iizuka, Y. (2003).** *Transitions in otolith Sr:Ca ratios of the Japanese eel (Anguilla japonica) elvers from the estuary to the river*. *Marine Ecology Progress Series*, 245, 213–221.

**Tzeng, W. N., Sehgal, C. N., & Lee, Y. C. (1997).** *Use of otolith microchemistry to investigate the environmental history of the Japanese eel (Anguilla japonica)*. *Marine Ecology Progress Series*, 161, 193–203.

## V



**Van Banning, P., & Haenen, O. L. M. (1990).** *Effects of the swimbladder nematode Anguillicola crassus in wild and farmed eel (Anguilla anguilla).* In **Perkins, F. O., & Cheng, T. C. (Eds.),** *Pathology in Marine Science* (pp. 317–330). Academic Press.

**Van Ginneken, V. J. T., & Van den Thillart, G. (2000).** *Eel fat stores are enough to reach the Sargasso.* *Nature*, 403, 156–157.

**van Nieuwerkerken, E. (2011).** *Order Lepidoptera Linnaeus, 1758.* *Zootaxa*, 3148.

**Verreault, G., & Dumont, P. (2003).** *An estimation of American eel escapement from the Upper St. Lawrence River and Lake Ontario in 1996 and 1997.* In **Dixon, D. A. (Ed.),** *Biology, Management, and Protection of Catadromous Eels* (pp. 243–251). American Fisheries Society Symposium, 33.

**Vigier, J. F. (1997).** *Les pathologies des anguilles. Synthèse des connaissances sur la pathologie chez différentes espèces du genre Anguilla.* CEMAGREF Éditions, 198 p.

**Vøllestad, L. A. (1992).** *Geographic variation in age and length at metamorphosis of maturing European eel: Environmental effects and phenotypic plasticity.* *Journal of Animal Ecology*, 61, 41–48.

**Vøllestad, L. A., & Jonsson, B. (1988).** *A 13-year study of the population dynamics and growth of the European eel *Anguilla anguilla* in a Norwegian river: Evidence for density-dependent mortality, and development of a model for predicting yield.* *Journal of Animal Ecology*, 57, 983–997.

**Von Nordmann, A. (1832).** *Mikrographische Beiträge zur Naturgeschichte der wirbellosen Thiere.* Berlin: Gebrüder Reimer.

## W

**Anderson, P. W. (1954).** *A mathematical model for the narrowing of spectral lines by exchange or motion.* *Journal of the Physical Society of Japan*, 9(3), 316–339.

**Walsh, M. G., & Pease, A. P. (2002).** *The occurrence of American eels (*Anguilla rostrata*) in the Hudson River estuary.* *Journal of Freshwater Ecology*, 17(3), 529–531.



**Walsh, P. J., Foster, G. D., & Moon, T. W. (1983).** *The effects of temperature on metabolism of the American eel, *Anguilla rostrata*; compensation in the summer and torpor in the winter.* *Physiological Zoology*, 56, 532–540.

**Wariaghli, F. (2013).** *Étude écotoxicologique et parasitologique chez l'Anguille (*Anguilla anguilla* L.) dans les estuaires marocains : Sebou et Loukkos (Atlantique) (Thèse de doctorat).* Université Mohamed V, Maroc, 190 p.

**Watanabe, S., Aoyama, J., Nishida, M., & Tsukamoto, K. (2005).** *A molecular genetic evaluation of the taxonomy of eels of the genus *Anguilla* (Pisces: Anguilliformes).* *Bulletin of Marine Science*, 76, 675–690.

**Wenner, C. A., & Musick, J. A. (1975).** *Food habits and seasonal abundance of the American eel, *Anguilla rostrata*, from the lower Chesapeake Bay.* *Chesapeake Science*, 16(1), 62–66.

**Westerberg, H. (2006).** *Orientation of silver eel (*Anguilla anguilla*) in a disturbed geomagnetic field.* *Journal of Fish Biology*, 69(1), 301–313.

**WGEEL (2020).** *Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eels (WGEEL) Report 2020.* *ICES Scientific Reports*, 2(85), 208 pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.7460>

**Wickström, H., & Westerberg, H. (2006).** *Migration behaviour of silver eels (*Anguilla anguilla*) released in the Baltic Sea.* *Journal of Fish Biology*, 69(1), 145–156.

**Wilson, J. M. (2004).** *The physiology of salinity adaptation in teleost fish: Lessons from euryhaline species.* *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 138(3), 281–299.

**Wippelhauser, G. S., Kleckner, R. C., & McCleave, J. D. (1985).** *Vertical distribution and diel movements of American eel *leptocephali* in the Sargasso Sea.* *Transactions of the American Fisheries Society*, 114(3), 445–452.

**Wirth, T., & Bernatchez, L. (2001).** *Genetic evidence against panmixia in the European eel.* *Nature*, 409, 1037–1040. <https://doi.org/10.1038/35059079>



[www.mdpi.com/2076-2615/10/12/2374](http://www.mdpi.com/2076-2615/10/12/2374)

[www.observatoire-rhonemediterranee.fr](http://www.observatoire-rhonemediterranee.fr)

## Z

**Yamada, Y., Tanaka, S., & Yamamoto, T. (2001).** *Spawning time and frequency of the Japanese eel (*Anguilla japonica*) under rearing conditions.* *Aquaculture*, 200, 323–333.

**Yıldırım, A., Benli, A. Ç. K., & Özkul, A. (2009).** *Toxicity of ammonia and nitrite to *Anguilla anguilla*.* *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 27(1), 14–17.

**Yildiz, H. Y., Benli, A. Ç. K., & Özkul, A. (2010).** *Acute toxicity of heavy metals to juvenile European eels (*Anguilla anguilla*).* *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(9), 1946–1951.

**Zacchéi, A. M., & Tavoraro, P. (1988).** *Lateral line system during the life cycle of *Anguilla anguilla* L.* *Bollettino di Zoologia*, 3, 145–153.

**Zenimoto, K., Tsukamoto, K., & Kimura, S. (2011).** *Habitat modeling for Japanese eel *leptocephali* in the western North Pacific.* *Fisheries Oceanography*, 20(5), 329–342.

**Zerizghi, T., Addisu, B., & Mebrahtu, B. (2020).** *Heavy metal bioaccumulation in eels: A review of contamination levels and impacts.* *African Journal of Aquatic Science*, 45(2), 187–198.

**Zoega, G. (1776).** *Tentamen historiae naturalis anguillae. Hafniae: Apud Gyldendal.*