

Travail de fin d'études

Auteur : Backory, Léa

Promoteur(s) : Nzau Matondo, Billy; Ovidio, Michael

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15906>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Master de Spécialisation en Gestion des
Ressources Aquatiques et Aquaculture

Travail de Fin d'Etude



**Comportement des stades avancés de l'anguille
européenne de repeuplement, après un épisode de
crues majeures, dans une diversité typologique des
cours d'eau Wallons**

Réalisé par : Backory Léa

Promoteurs : Dr. B. Nzau Matondo et Prof. M. Ovidio

Année académique 2021-2022

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué au bon déroulement de ce mémoire et qui m'ont accueilli au sein de l'Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et d'Aquaculture.

Je voudrais dans un premier temps remercier mes promoteurs, Dr. Billy Nzau Matondo et Prof. Michaël Ovidio, pour leur bienveillance, le temps qu'ils m'ont consacré dans la rédaction de ce TFE et pour le partage de leurs connaissances et expérience dans ce milieu.

Mes remerciements s'étendent également à tous les enseignants du master de spécialisation en Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture et notamment le Dr. Carole Rougeot.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à ma famille, mon copain et mon camarade de classe François qui m'ont soutenue, encouragée, tout le long de l'année et notamment lors de la réalisation de ce TFE.

RESUME

Cette étude se situe dans la continuité des recherches débutées en 2017 par l'Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture (UGERAA) de l'Université de Liège. Ces recherches ont vu le jour, au vu de la nécessité de conserver l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), actuellement en état préoccupant de déclin en Europe et notamment en Wallonie. Le repeuplement de civelles est alors envisagé comme une des solutions pour ralentir/stopper le déclin de l'espèce. L'objectif principal visé est d'optimiser la pratique du repeuplement pour un recrutement maximal dans les rivières vidées de leurs stocks d'anguilles.

La présente étude est réalisée, en 2022, après un épisode de crues majeures destructives des habitats survenu en juillet 2021, sur les anguilles ayant atteint le stade 5+ après leur déversement au stade des civelles en 2017, dans 6 rivières typologiquement différentes sur le plan hydromorphologique, physico-chimique et ressource trophique. Elle a consisté à rechercher les anguilles marquées dispersées par les crues ou les anguilles marquées installées dans de nouveaux habitats après destruction de leurs anciens refuges pendant les crues ou lors des travaux de réparation des berges par les engins de chantier. Les anguilles 5+, contrairement aux stades plus jeunes, vivent dans des eaux plus profondes. Le substrat de fond le plus utilisé est de type blocs et son utilisation augmente avec le stade de vie de l'anguille. Le plat courant est le faciès d'écoulement le plus utilisé et le taux de son utilisation augmente avec l'âge. De plus, quel que soit le stade de vie de l'anguille, une rivière avec une eau au pH légèrement alcalin, un niveau en ressources trophiques élevées et une forte couverture végétale est privilégiée comme milieu d'accueil des anguilles.

Un autre enjeu a également vu le jour suites aux crues qui ont fortement touché la Wallonie et ont par conséquent impacté ces rivières. Malgré la destruction de leurs habitats, les anguilles ont été trouvées dans toutes les rivières étudiées et impactées à des degrés divers allant de rivières peu impactées (catégorie II) à celles très impactées (catégorie IV) par les crues. Les indices de mobilité observés, élevés, soutiennent cette forte mobilité qui a également été observé dans la Hoëgne, rivière très dégradée (catégorie IV). Ces connaissances peuvent servir d'appuis et de guide pour le choix des rivières lors des futurs repeuplements et pour d'éventuels futurs plans d'actions de conservation et sauvegarde de l'espèce et restauration des habitats altérés.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| Remerciements | |
| Résumé | |
| Table des matières | 4 |
| 1. Introduction..... | 1 |
| 1.1. Ecologie sur l'anguille européenne | 1 |
| 1.1.1. Systématique et morphologie | 1 |
| 1.1.2. Cycle de vie | 2 |
| 1.1.3. Dynamique de l'utilisation de l'habitat | 4 |
| 1.1.4. Typologie du comportement lors de la colonisation des eaux continentales..... | 5 |
| 1.2. Situation démographique de l'anguille européenne | 6 |
| 1.2.1. Au niveau international | 6 |
| 1.2.2. A l'échelle de la Wallonie | 7 |
| 1.3. Causes du déclin de l'espèce | 8 |
| 1.4. Plan de sauvegarde | 9 |
| 1.4.1. Mesures de protection | 9 |
| 1.4.2. Repeuplement | 10 |
| 1.5. Problématique et objectifs du TFE | 11 |
| 2. Matériel et méthodes..... | 13 |
| 2.1. Repeuplement en civelles | 13 |
| 2.2. Zone d'étude | 13 |
| 2.3. Campagne physicochimique..... | 15 |
| 2.4. Techniques de suivi post-repeuplement | 15 |
| 2.4.1. Pêche électrique | 15 |
| 2.4.2. Détection télémétrique | 16 |
| 2.5. Échelle de dégradation des cours d'eau scannés..... | 17 |
| 2.6. Comportement et mouvement des anguilles | 17 |
| 2.7. Analyses de données | 18 |
| 3. Résultats | 19 |
| 3.1. Bilan des sessions télémétriques de détection | 19 |
| 3.2. Caractéristiques physico-chimiques, degré de dégradation de l'habitat et présence d'anguilles..... | 20 |
| 3.3. Paramètres de mobilité et profils comportementaux | 21 |
| 3.4. Dispersion des anguilles | 23 |
| 3.4.1. Dispersion latérale..... | 23 |
| 3.4.2. Dispersion longitudinale..... | 23 |
| 3.5. Utilisation de l'habitat | 24 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.5.1. | Substrat de fond | 24 |
| 3.5.2. | Faciès d'écoulement..... | 25 |
| 3.5.3. | Profondeur | 26 |
| 3.5.4. | Couverture..... | 27 |
| 4. | Discussion | 28 |
| 4.1. | Performance de la méthodologie de détection mobile sur des longs parcours de rivière ... | 28 |
| 4.2. | Flexibilité d'exploitation des macro-habitats variés et capacité de résilience de l'espèce .. | 30 |
| 4.3. | Indicateurs de mobilité..... | 31 |
| 4.4. | Comportement..... | 31 |
| 4.5. | Dispersion..... | 33 |
| 4.6. | Utilisation de l'habitat | 33 |
| 5. | Conclusion et recommandations..... | 35 |
| | Annexe..... | 43 |

1. INTRODUCTION

1.1. Ecologie sur l'anguille européenne

1.1.1. Systématique et morphologie

Les anguilles sont des poissons appartenant à la classe des Actinoptérygiens, à l'ordre des Anguilliformes et à la famille des Anguillidés. On dénombre actuellement, à l'aide des traits morphologiques (Ege, 1939) couplés à des analyses de génétiques moléculaires (Watanabe et al., 2005, 2009), 19 espèces et sous espèces d'anguilles dont l'anguille européenne qui nous intéresse dans le cadre de ce TFE.

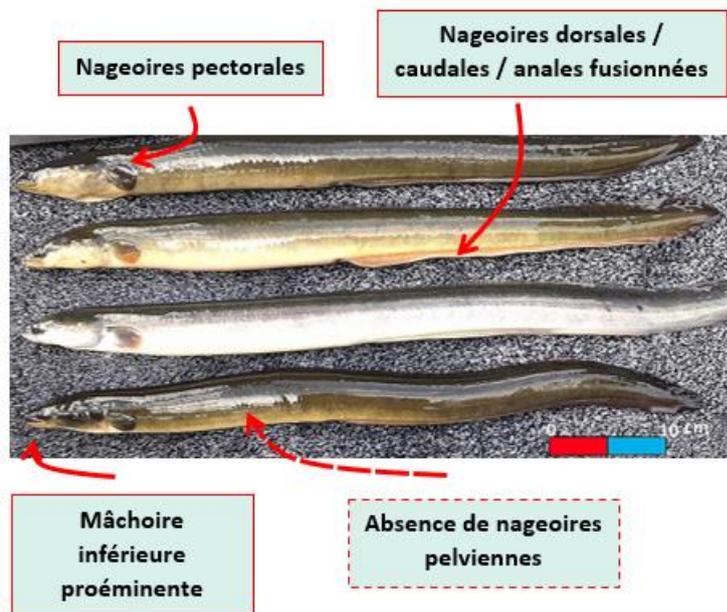


Figure 1: Caractéristiques morphologiques de l'anguille européenne (Photographie de Nzau Matondo Billy modifiée).

Les anguilles sont des poissons cryptiques de forme allongée et cylindrique. Leur tête est étroite et leur permet de se cacher dans l'environnement, en lien avec leur mode de vie. En raison de cette forme longiligne, l'appareil branchial se situe presque à l'arrière de la tête. De plus, on observe sur ces espèces, une bouche terminale avec une mâchoire inférieure proéminente. Elles ne possèdent pas de nageoire ventrale ni de ceinture pelvienne, mais ont des nageoires pectorales appariées. Tandis que les nageoires dorsales et anales, longues, sont soudées à la caudale arrondie (Tesch & Thorpe, 2003) (Figure 1).

Les Anguillidés possèdent des écailles, rudimentaires et disposées irrégulièrement sur leur corps et non en superposition comme la majorité des poissons (Tesch & Thorpe, 2003). Leur derme a tendance à s'épaissir à l'âge adulte et la surface occupée par les écailles à augmenter (Pankhurst, 1982a). Leur peau est recouverte de mucus ce qui leur permet de mieux s'adapter aux transitions vers les eaux de mer (Simonneaux et al., 1987). Il s'agit d'une barrière contre les flux d'eau et d'électrolytes engendrés par les gradients osmotiques. La couleur de leur robe varie en fonction de leur pigmentation qui dépend des différents stades ontogéniques, mais aussi des facteurs environnementaux et de l'habitat (Pankhurst & Lythgoe, 1982).

1.1.2. Cycle de vie

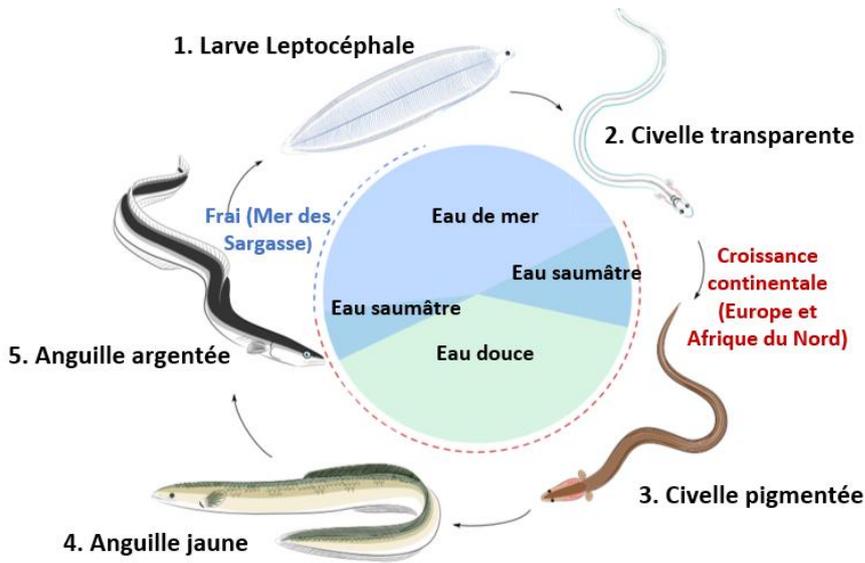


Figure 2 : Cycle de vie de l'anguille européenne. Schéma modifiée (Cresci, 2020)

L'anguille européenne est une espèce diadrome et plus précisément catadrome facultative : la majorité des individus migrent de l'eau de mer à une eau douce, lorsqu'une plus faible proportion resterait en eau de mer (Daverat et al., 2006). Pendant longtemps, on a pensé que l'anguille européenne ne se reproduisait qu'en mer des sargasses. Une nouvelle étude met, cependant en évidence la possibilité qu'une zone de frai favorable pourrait se trouver à l'est de la mer des Sargasse, à l'intersection entre la dorsale médio-atlantique et les fronts océaniques (Chang et al., 2020). Elle subit au cours de son cycle de vie de nombreuses métamorphoses. Les larves issues de cette reproduction, appelées leptocéphales, sont transportées par le courant du Gulf Stream et le courant Nord Atlantique et traversent l'Atlantique par ce biais (Aarestrup et al., 2009). Il semblerait que ces larves tirent des informations cartographiques du champ magnétique terrestre afin de cibler le Gulf Stream (Naisbett-Jones et al., 2017). Ces larves sont transparentes, aplaties et se nourrissent de plancton.

A l'approche des côtes Est de l'Atlantique, les larves se métamorphosent en civelles transparentes. Leurs corps changent radicalement, la section transversale du corps devient cylindrique, des pigments cutanés apparaissent, la mâchoire s'élargit et la composition des pigments visuels changent pour s'adapter à l'eau douce (Tesch & Thorpe, 2003; Wood et al., 1992). Elles pénètrent dans les estuaires d'Europe et d'Afrique du Nord (Figure 3) et migrent en amont des cours d'eau. Des études ont révélé que ces civelles suivent des gradients d'odeur et de salinité, semblent éviter la lumière, changent d'orientation et de profondeur en fonction des marées et utilisent des repères lunaires et le champ magnétique terrestre pour s'orienter

(Cresci, 2020). Ces civelles, d'abord transparentes, se pigmentent et deviennent ensuite des anguillettes puis anguilles jaunes lors de la colonisation active des bassins versants. Leur mode de vie devient alors plus sédentaire et c'est à ce moment qu'elles entament une phase de croissance (Ovidio et al., 2013). La croissance a lieu dans une large gamme de milieux aquatiques tels que les fleuves, les estuaires, les marais, les rivières et les ruisseaux (Daverat et al., 2005). C'est notamment à ce stade, que les anguilles sont les plus sensibles à la pollution. Leur teneur en matière grasse est élevée et leur alimentation est benthique, cela accroît la bioaccumulation de polluants pendant cette période (Maes et al., 2005). Or, ces réserves lipidiques sont essentielles pour les processus de migration et de reproduction de l'anguille argentée, lesquels sont très coûteux en énergie. En effet, pendant la migration vers la mer des Sargasses, les anguilles jeûnent et la réussite de leur cycle de vie dépend des réserves lipidiques préalablement stockées pendant leur phase de croissance. Seuls les individus de grande taille, à forte teneur en lipides sont susceptibles d'atteindre le site de reproduction et donc de contribuer aux stocks de reproducteurs (Belpaire et al., 2009).

La dernière métamorphose est celle de passage de stade de croissance « anguille jaune » à celui de reproducteurs appelés « anguille argentée ». Les anguilles argentées présentent un changement important, celui de la dégénérescence du tractus digestif de l'anguille lié à l'installation d'un jeûne physiologique (Marchelidon et al., 1999). Ces modifications se produisent tôt dans la maturation sexuelle et suggèrent que ces changements sont nécessaires aux phénomènes de migration et de frai (Pankhurst, 1982b). Cette transition est liée à de variations hormonales : une augmentation de l'hormone thyroïdienne T4 (rôle dans la métamorphose), une augmentation des hormones induisant la puberté (hormones gonadotropes), de jeûne et des hormones de croissance (Marchelidon et al., 1999). Ces anguilles grandissent en eaux douces jusqu'à maturité partielle, et après 5 à 25 ans deviennent anguilles argentées, migrent de l'eau douce jusqu'en mer des Sargasses pour s'y reproduire (Cresci, 2020), on parle de dévalaison. La fin de la maturité s'effectue pendant ladite migration. On retrouve *Anguilla anguilla* depuis le nord de la Norvège, le long des côtes européennes, des côtes méditerranéennes, des côtes nord-africaines et en mer des Sargasses (Dekker, 2003) (Figure 3). L'aire de répartition continentale de l'anguille européenne s'étendrait sur une zone d'environ 90 000 km² (Moriarty & Dekker, 1997).

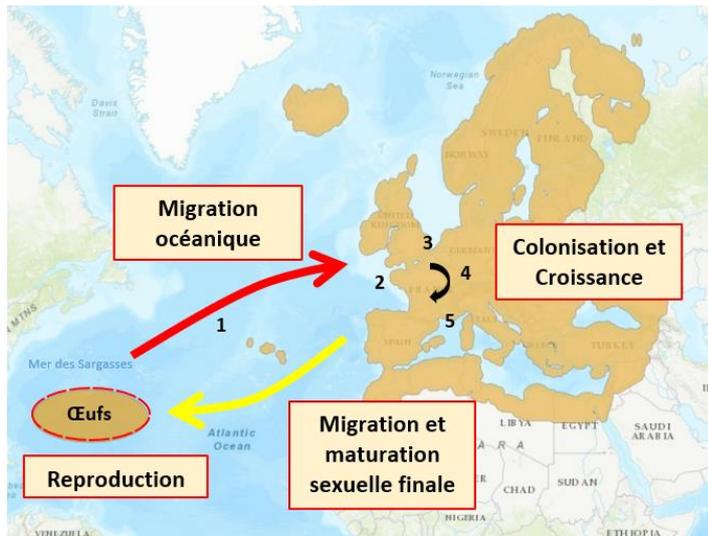


Figure 3 : Carte de la répartition de l'anguille européenne modifiée (Pike et al., 2018). Les numéros indiquent les stades biologiques : le numéro 1 est la larve leptocéphale, le 2 la civelle transparente, le 3 la civelle pigmentée, le 4 l'anguille jaune et le 5 l'anguille argentée. La surface orange représente l'aire de répartition de l'espèce.

1.1.3. Dynamique de l'utilisation de l'habitat

La qualité de l'habitat est un paramètre important de conservation de l'anguille en milieux aquatiques. L'espèce montre une dynamique dans l'utilisation de l'habitat physique en fonction des stades de développement et de la croissance morphologique. Des récentes études, menées en milieux continentaux, ont révélé que les abondances et biomasses maximales sont associées aux rivières alcalines, eutrophes, avec une grande rugosité des substrats du lit, une diversité dans les faciès d'écoulement ainsi qu'une faible densité de prédateurs (Nzau Matondo et al., 2021). La granulométrie élevée des substrats est positivement corrélée à la présence des anguilles, car elle est source d'une plus grande diversité d'espèces et donc de ressources alimentaires et leur permet par la même occasion de se cacher des prédateurs environnants (Nzau Matondo et al., 2019). Ces préférences de milieu semblent tout de même varier en fonction de la taille des anguilles. A partir de 300 millimètres, les anguilles changent de préférence d'occupation et recherchent des milieux peu profonds à plus profonds. Cela est sans doute corrélé à leur différence d'alimentation : les petites anguilles consomment des macros invertébrées tandis que les anguilles plus âgées sont plutôt piscivores (Michel, 1995) et mangent également des jeunes anguilles en cas de forte densité. Les jeunes anguilles se retrouvent alors exclues des zones de plus grande profondeur de par le comportement territorial et l'alimentation des anguilles plus âgées (Laffaille et al., 2003).

Tous les stades de vie cherchent refuge dans le milieu : les civelles se cachent dans le sable ou le gravier avec une préférence pour le gravier fin qui permet une durée d'enfouissement plus courte et moins de mouvements corporels. De plus, les performances

de fouissage augmentent avec la taille du corps, car les civelles ont besoin de plus d'ondulations corporelles pour se cacher que les stades plus avancés (Steendam et al., 2020). Les anguilles exploitent souvent des cavités constituées par des assemblages de blocs et des racines (Figure 4). Leur peau lisse et leur corps longiligne est un atout et leur permet de se glisser entre les cachettes et de ramper sur des parois humides et rugueuses lorsqu'elles veulent franchir un obstacle (Baudoin et al., 2015; Legault, 1988) et diversifier leurs zones d'activité. L'anguille est une espèce à activité nocturne et peut également manifester une certaine activité en temps pluvieux et nuageux (LaBar et al., 1987). La température joue également un rôle dans son déplacement (Ovidio et al., 2013).



Figure 4 : Photos d'abris utilisés par les anguilles. En (a) un assemblage de blocs et en (b) des racines.

1.1.4. Typologie du comportement lors de la colonisation des eaux continentales

Lorsque les civelles arrivent en eaux estuariennes, une modification comportementale s'opère. Elles passent d'une phase majoritairement passive où elles se laissent porter par le courant à une phase plus active de colonisation du milieu. Des techniques migratoires alternatives voient alors le jour. Certaines se déplacent vers l'amont, on parle de montaison, tandis que d'autres privilégient une installation précoce et se sédentarisent dans les parties plus basses des fleuves, estuaires, marais (Daverat et al., 2006). Un des facteurs qui influence la préférence de l'une ou l'autre des stratégies serait dû à l'état corporel de la civelle. En effet, plus son facteur de condition est bon plus elle aura tendance à préférer les eaux douces et au contraire si ce facteur est faible, elle serait préférentiellement attirée par les eaux salées (Edeline et al., 2006). Le comportement migratoire serait donc bien affecté par l'état énergétique des civelles, représenté par leur facteur de condition. Les civelles qui n'ont pas l'énergie nécessaire, ne se lancent pas dans des migrations fluviales, coûteuses par la nage à contre-courant et la reptation, qui utiliserait toute leur énergie et qui engendrerait leur décès par épuisement.

Feunteun (2002) a identifié 4 comportements de mouvements distincts lors du processus de colonisation naturelle des cours d'eau par les anguilles sauvages. Les fondateurs

(= "founders") colonisent les rivières et se sédentarisent dès qu'ils trouvent le premier habitat favorable disponible qu'ils rencontrent. Les pionniers (= "pioneers") migrent le plus en amont du système fluvial. Les résidents du domaine vital (= "home range dwellers") s'établissent sur une aire donnée pendant plusieurs années. Enfin les nomades (= "nomads") qui sont des anguilles erratiques effectuent un déplacement généralement vers l'amont, lorsqu'elles recherchent des habitats appropriés pour s'établir. Ces comportements ne s'excluent pas mutuellement, toute anguille passe d'un comportement à un autre, en fonction d'attributs ontogénétiques (âge, expérience, morphologie etc.) (Laffaille et al., 2003), des paramètres démographiques qui déterminent les mouvements dépendant de la densité et des paramètres environnementaux (Nourriture, température, débit et capacité d'accueil du milieu).

Nzau Matondo *et al.* (2019) ont observé 5 catégories de comportement de mouvements distincts lors de colonisation d'un cours d'eau après opération de repeuplement en civelles. Les ascendants qui sont des anguilles qui ne font que remonter pour s'installer plus en amont du cours d'eau, les descendants qui ne font que descendre le cours d'eau, les oscillants ascendant et les oscillants descendant qui se déplacent vers l'amont et vers l'aval mais le bilan des mouvements montre une progression vers l'amont pour le premier ou une progression vers l'aval pour le second, et enfin les stationnaires qui ne quittent pas leurs sites de repeuplement et/ou de marquage.

1.2. Situation démographique de l'anguille européenne

1.2.1. Au niveau international

En 2008, l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) entre dans la liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) car elle est considérée comme en danger critique d'extinction (Pike et al., 2018). De plus, depuis 2009, la convention de Washington relative au commerce international des espèces de faune et flore menacées d'extinction (CITES), protège cette espèce de la surexploitation. Le rapport du Conseil International pour l'Exploration de la Mer (CIEM) de 2019 met en évidence une forte diminution des indices de recrutement des alevins de l'anguille européenne, appelés civelles, de 1980 à 2011, que ce soit en mer du nord ou ailleurs dans le monde (Figure 5a). En ce qui concerne les anguilles jaunes, stade plus avancé, le recrutement est lui aussi en nette baisse (Figure 5b). Cependant, les analyses statistiques de la série des civelles mettent en évidence une augmentation, au cours de la période 2011-2019, à un taux significativement différent de

zéro, avec la valeur la plus élevée en 2014 (ICES, 2020). Cette augmentation est considérée comme insuffisante pour changer sa catégorie d'évaluation (Pike et al., 2018). En effet, le CIEM conseille plus que jamais de diminuer tous les impacts anthropiques afin de préserver l'espèce et lui permettre de prospérer.

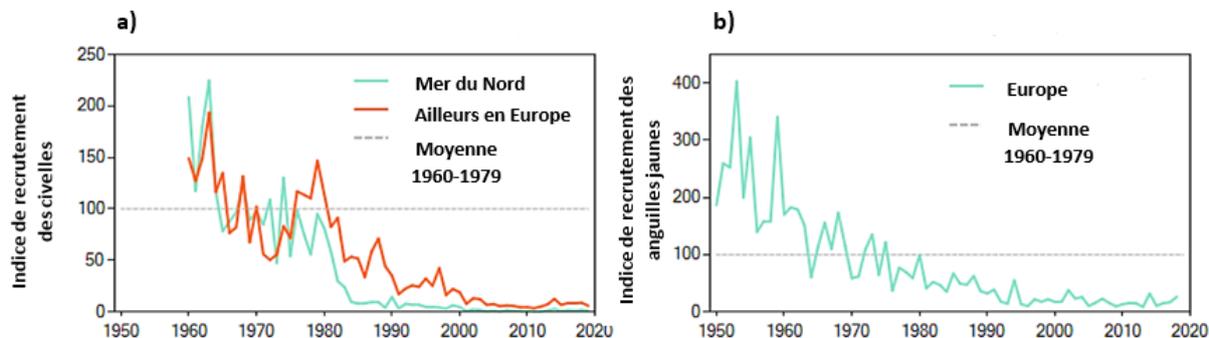


Figure 5 : Evolution du recrutement en a) des civelles en Mer du Nord et ailleurs en Europe. Indices estimés à partir d'un Modèle Linéaire Généralisé (MLG) ajusté avec 46 séries temporelles. Les prédictions ont été mises à l'échelle de la moyenne de 1960 à 1979. La série « Mer du Nord » : Norvège, la Suède, l'Allemagne, le Danemark, les Pays-Bas et la Belgique. Les séries "Ailleurs" : Royaume-Uni, d'Irlande, de France, d'Espagne, du Portugal et d'Italie. En b) évolution du recrutement des anguilles jaunes en Europe estimé à l'aide d'un MLG. Il a été ajusté à 13 séries chronologiques d'anguilles jaunes et mis à l'échelle de la moyenne 1960-1979. Figure modifiée (ICES, 2020).

1.2.2. A l'échelle de la Wallonie

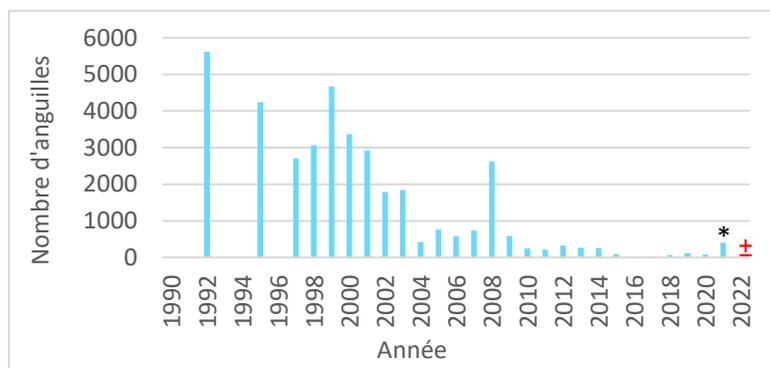


Figure 6 : Variation annuelle des captures d'anguilles jaunes ascendantes au niveau d'une échelle à poisson du barrage de la Visé-Lixhe (Wallonie) entre 1992 et 2022. Figure modifiée (Nzau Matondo & Ovidio, 2016). * Données incomplètes à cause de l'inaccessibilité de l'échelle non fonctionnelle après les crues de 2021. ± Pas de données (échelle à poisson toujours non fonctionnelle).

Depuis 1992, la population d'anguilles jaunes dans la Meuse est surveillée au niveau du barrage de Lixhe. Cela a permis de mettre en évidence une diminution de 4,2 % de la population d'anguilles entrant en Wallonie depuis la mer du Nord (Figure 6 :) (Nzau Matondo & Ovidio, 2016). Après les crues de mi-juillet 2021 en Wallonie, l'échelle à poisson est devenue inaccessible et encombrée, les données ont alors été impossible à prendre. En effet, dans le bassin de la Meuse belge en Wallonie, l'état de conservation de l'anguille européenne est considéré comme mauvais : les stocks d'anguilles ont fortement diminué ces dernières années. Une chute de 3,6 % par an entre 1992 à 2020 est observée dans le nombre d'anguilles jaunes remontant la Meuse depuis la mer du nord et passant par la Meuse néerlandaise. Ce

nombre atteint, en 2020, 0,6 % du stock observé en 1992 (Nzau Matondo et al., 2022). D'après le CIEM, ce déclin est dû au faible recrutement des civelles en mer du nord qui atteint, en 2019, 1,4 % du niveau moyen de 1960-1979 (ICES, 2020). On observe aujourd'hui, dans le bassin de la Meuse belge en Wallonie, des peuplements faibles d'individus âgés qui prochainement iront en mer des Sargasses se reproduire. Si aucune action de préservation n'est entreprise, il n'y aura plus d'anguilles dans la Meuse dans les 20 prochaines années (Nzau Matondo & Ovidio, 2021).

1.3. Causes du déclin de l'espèce

Le déclin de *A. anguilla* est dû à un effondrement de recrutement des jeunes stades en mer, une baisse de colonisation des eaux continentales, une faible survie dans les cours d'eau et un nombre trop faible d'adultes reproducteurs qui retournent en mer des Sargasses s'y reproduire (Philippart, 2007). Les causes sous-jacentes de ces observations sont de l'ordre du naturel et d'origines anthropiques.

Les réchauffements climatiques sont auteurs d'événements rarissimes, d'une extrême violence, comme les ouragans et les crues historiques. Ces événements ont de l'influence sur l'habitat physique et les peuplements piscicoles. Dans la nuit du mercredi 14 au vendredi 16 juillet 2021, des inondations historiques accompagnées des crues d'une extrême violence ont touché la Wallonie en Belgique. De plus, le réchauffement climatique provoque des fluctuations des courants océaniques, dont le Gulf Stream, et va induire des modifications dans l'aire de distribution des larves leptocéphales, une stratification thermique en mer des Sargasses entraînant une production primaire faible. Le succès de reproduction notamment la survie et la dérive larvaire se voit alors affectés (Friedland et al., 2007).

La pollution de l'eau joue un rôle majeur dans la dégradation de l'habitat et par conséquent dans le déclin des populations d'anguilles. Notamment de trop fortes contaminations aux perturbateurs endocriniens comme le polychlorobiphényles (PCBs), la dioxine et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAHs) ont des conséquences néfastes sur les mécanismes physiologiques de la reproduction et le succès de migration retour sur le site unique de reproduction (Palstra et al., 2006; Van Ginneken et al., 2009).

Une mauvaise gestion des ouvrages estuariens, constitue des barrières physiques (turbines, pompes et barrages hydroélectriques) empêchant les migrations essentielles au

bon déroulement du cycle de vie de l'espèce et induisant une forte mortalité (Crivelli et al., 2008). La perte de la diversité d'habitats est également une conséquence des activités humaines par la canalisation des rivières et le drainage des zones humides. De plus, la pêche des anguilles est pratiquée depuis des millénaires et cible tous les stades de vie continental. Il s'agit de l'espèce commerciale la plus importante du monde et la relation entre l'exploitation de cette espèce et la réduction du stock sauvage est évidente (Violi et al., 2015). Cette espèce est victime de surpêche et de braconnage dans la majorité des bassins versants.

Parmi les causes naturelles, on peut citer l'infestation des anguilles par un nématode parasite ravageur. Ce nématode hématophage, *Anguillicola crassus*, s'attaque à leur vessie natatoire, organe indispensable à la natation et à la bonne flottaison de l'espèce et va provoquer son inflammation. Il entraîne une augmentation des maladies infectieuses, du stress et une perte de l'appétit (Lefebvre et al., 2013). On peut également parler de la prédation par d'autres espèces qui impacte également le stock d'anguilles. Celle-ci se fait par les poissons et oiseaux piscivores tels que le grand cormoran *Phalacrocorax carbo sinensis* (Oehm et al., 2017), le héron *Ardea cinerea* (Feunteun & Marion, 1994), la truite *Salmo trutta* et des mammifères marins comme la loutre *Enhydra lutris* par exemple (Libois & Rosoux, 1989).

1.4. Plan de sauvegarde

1.4.1. Mesures de protection

Face au déclin des populations d'anguilles européennes, la Commission européenne publie en 2007 un règlement (n°1100/2007) ayant pour objectif de réduire cette mortalité, d'origine anthropique, afin que le taux d'échappement vers la mer se rapproche de celui qui aurait été observé sans aucune pression humaine. De ce règlement, voit le jour, des plans de gestion d'*A. anguilla* dans tous les pays de l'Union européenne. Ces plans de gestion intègrent plusieurs mesures telles que : la réduction de l'activité de pêche commerciale et récréative, l'amélioration de l'habitat, la lutte contre les prédateurs, l'arrêt temporaire des centrales électriques et l'application des mesures de repeuplement. En Belgique, le Plan Anguille a été produit en fin 2008 et accepté par l'Union européenne en janvier 2010. En Wallonie, certaines mesures de sauvegarde et protection de l'espèce sont mises en œuvre dans le cadre de ce plan. Parmi ces mesures, on trouve l'amélioration des voies de montaison des juvéniles anguilles jaunes (mise en place des échelles à poissons à reptation), la baisse de mortalité lors

de la dévalaison des géniteurs anguilles argentées (turbines fish-friendly, routes de dévalaison), l'interdiction de pêche à l'anguille et le soutien aux peuplements locaux par des repeuplements réguliers.

1.4.2. Repeuplement

Une des solutions, citée dans le règlement n°1100/2007, afin de faire face au déclin des stocks d'anguille est de repeupler les écosystèmes aquatiques. Le repeuplement consiste à transférer des jeunes stades de l'espèce, ici des civelles, des estuaires vers des habitats des milieux aquatiques continentaux où il y a peu de colonisation naturelle (Nzau Matondo et al., 2015). Cette pratique dépend encore des captures de civelles sauvages, car l'élevage des anguilles en captivité n'est pas encore opérationnel (Pedersen & Rasmussen, 2016). En Wallonie, le repeuplement à des fins de conservation de l'espèce date de la fin des années 1960 mais celui réalisé à des fins scientifiques commence en 2013 (Philippart et al., 2010). Cependant, ces repeuplements ne doivent pas être pris à la légère. L'efficacité de cette pratique a d'ores et déjà été prouvée, les anguilles repeuplées s'adaptent, grandissent, se dispersent, s'argentent et forment des peuplements au sex-ratio en faveur des femelles (Nzau Matondo et al., 2022). Or, la prédominance de femelles est un facteur indispensable à la sauvegarde et conservation de cette espèce et à l'amélioration des stocks locaux et des stocks panmictiques se reproduisant en mer. Cependant, des risques sanitaires existent et résident principalement dans la contamination par le virus EVEX et le nématode *A. crassu* (Rigaud et al., 2015) des poissons sauvages locaux indemnes par des anguilles transloquées. La qualité sanitaire des civelles déversées et des anguillettes doit être contrôlée. Il faut également éviter pour le repeuplement d'utiliser de matériel biologique (civelles, anguillettes, anguilles jaunes) de moindre qualité contaminé par des polluants chimiques et organiques (Palstra et al., 2006).

Face aux enjeux actuels auxquels sont confrontées les anguilles européennes, il est nécessaire d'optimiser la pratique de repeuplement afin de maximiser le recrutement de nouveaux individus dans leurs rivières réceptrices et donc contribuer à stopper/ralentir le plus efficacement possible l'effondrement des stocks dans les zones géographiquement éloignées de la mer. Afin d'y parvenir, des études ont été et sont toujours effectuées par l'Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture (UGERAA) de l'Université de Liège. Ces études ont commencé à partir de l'année 2013 et sont financées par l'Europe (FEAMP) et la Wallonie (SPW). En 2013, des civelles européennes en provenance d'Angleterre ont été

déversées dans 3 ruisseaux aux caractéristiques typologiques différentes, en un seul point de déversement. A partir de ces déversements et des études qui ont suivi, les caractéristiques de cours d'eau qui permettent un bon recrutement sont connues.

Le 21 mars 2017, 17,3 kg de civelles (17,3 kg) ont été déversés dans 6 cours d'eau de Wallonie avec une densité de déversement de 2,4 kilogrammes par hectare. Ce déversement a permis d'extrapoler les connaissances scientifiques précédemment acquises lors de déversement de 2013 sur des cours d'eau d'une plus grande importance et typologiquement différents. Ces sites ont été choisis, car ils ont une bonne capacité d'accueil et ont des caractéristiques biotiques et abiotiques diverses afin de mieux appréhender les préférences environnementales des anguilles. Après ces repeuplements en 2017 et à des fins de suivis, de 2017 à 2020, quatre campagnes d'évaluation de l'efficacité du repeuplement ont été effectuées sur les déversements de 2013 et de 2017. Celles-ci ont été effectuées à l'aide de pêches électriques et ont permis de capturer 1458 anguilles. Le nombre d'anguilles capturées était différent en fonction des cours d'eau, mais également au sein de même cours d'eau sur des secteurs différents. De manière générale, les jeunes stades d'anguilles semblent s'être bien adaptés, sans doute grâce à leur forte capacité d'adaptation et de tolérances environnementales (Nzau Matondo et al., 2021). Lorsque les conditions sont favorables à l'optimum de vie de l'espèce, les repeuplements sont très efficaces. En effet, cette démarche de repeuplement exige un choix judicieux des types de cours d'eau : qu'elles aient une bonne capacité d'accueil. Un autre critère à prendre en compte est la quantité de civelles déversée et le mode de déversement. Le déversement en plusieurs points dans la rivière permet d'affiner et de mieux comprendre la dispersion, la densité de repeuplement, la dynamique de préférence d'habitat chez les anguilles. Sans ces connaissances, le repeuplement pourrait ne pas être optimisé et l'objectif de conservation de l'espèce pourrait ne pas être atteint.

1.5. Problématique et objectifs du TFE

Ce TFE fait, en effet, suite à des études menées à l'UGERAA sur l'évaluation de l'efficacité du repeuplement, afin d'améliorer nos connaissances sur la biologie et la préférence/utilisation de l'habitat par cette espèce. L'originalité et l'intérêt pour la présente étude se situe dans la biologie de matériel étudié, les anguilles de stades/âges avancés (anguilles 5+ c'est-à-dire à leur 6^{ème} année de vie en eau douce après leur déversement au stade des civelles) sont caractérisées par une forte sédentarité, photophobie et vie cryptique,

et dans l'influence des événements de graves crues historiques enregistrées en Wallonie. Le recensement par pêche automnale en post-crues a révélé une baisse générale d'abondance numérique dans les secteurs inventoriés chaque année après le déversement des civelles. Notamment après les crues de 2021, une baisse générale du nombre d'anguilles est observée de 2020 à 2021 dans les rivières étudiées (Figure 7). Cette baisse motive la nécessité de rechercher les individus perdus de cette espèce à grande longévité actuellement en pleine phase de sédentarité via l'application de la technique de télémétrie mobile basée sur la détection des individus marqués en scannant de longs linéaires/parcours des cours d'eau.

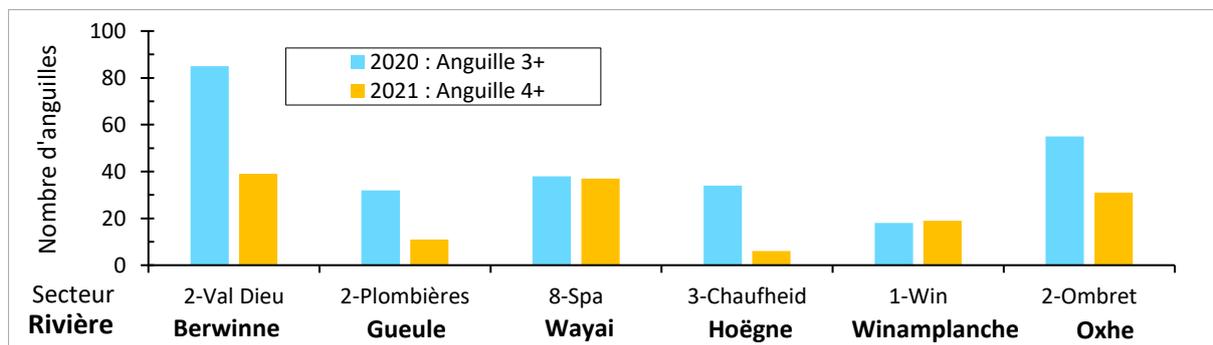


Figure 7 : Baisse générale des captures d'anguilles : recensement par pêche automnale de 2020 (avant les crues : anguille 3+) et 2021 (après les crues : anguilles 4+) dans les 6 rivières alevinées en civelles.

Le but de l'étude est de comprendre, dans une diversité typologique des cours d'eau, comment le stade avancé de l'espèce : **anguille 5+**, après le repeuplement a pu résister et se comporter face à ces crues d'une ampleur très rarissime grâce à l'utilisation de la technique de télémétrie mobile basée sur la détection d'individus marqués. Les objectifs spécifiques sont alors les suivants : (a) Déterminer l'abondance numérique et le taux de détection en post-crues, (b) Identifier les profils comportementaux, (c) Mesurer les paramètres de mobilité : la distance nette parcourue, la distance nette totale parcourue, le domaine vital et l'indice d'exploitation du domaine vital depuis le site de marquage et la dispersion, (d) Caractériser l'habitat actuellement occupé.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Repeuplement en civelles

Le 21 mars 2017, 76370 civelles, de bon état physiologique et sanitaire, capturées dans le Golfe de Gascogne en France fournies par la société Gurruchaga marée, ont été déversées dans 6 cours d'eaux wallons, différents d'un point de vue hydromorphologique, physicochimiques et trophique. Il s'agit de : la Berwinne, la Gueule, la Hoëgne, le Wayai, le Ruisseau de Winamplanche et l'Oxhe. Chaque rivière contenait plusieurs sites de déversement (respectivement 11, 10, 10, 6, 5 et 1). La densité de civelles déversées dans la Berwinne était de 1,19 individu.m², de 1,12 dans la Gueule, de 0,98 dans le Wayai, de 1,36 dans la Hoëgne, de 0,50 dans le Winamplanche et de 3,75 dans l'Oxhe. L'Oxhe avait une plus grande quantité de civelles, car le déversement s'est fait en un unique point avec les civelles restantes de la journée de déversement. Ces civelles mesuraient en moyenne 67 mm de longueur totale et avaient un poids moyen de 0,23 g.

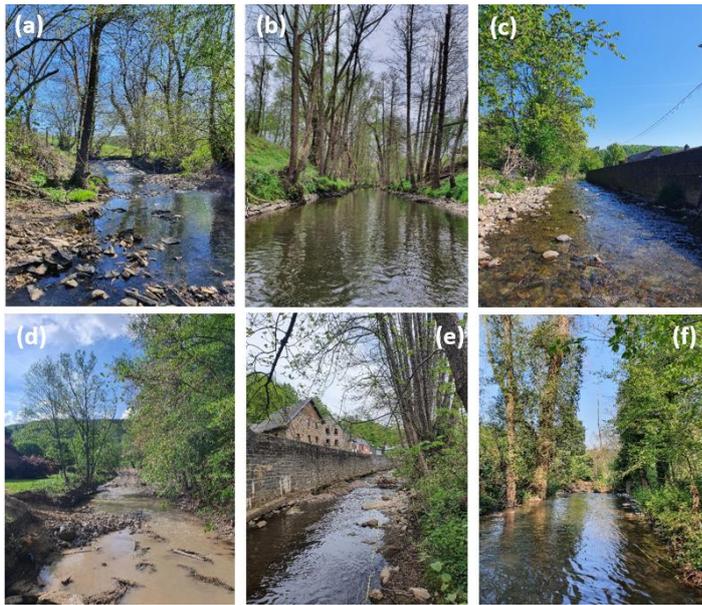
| Cours d'eau | Berwinne | Gueule | Wayai | Hoëgne | Winamplanche | Oxhe |
|--|----------|------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------|
| Caractéristiques générales | | | | | | |
| Altitude (m) | 144 | 155 | 172 | 178 | 221 | 100 |
| Bassin versant (km ²) | 118 | 380 | 97 | 128,9 | - | 45,3 |
| Affluent direct | Meuse | Meuse | Hoëgne | Vesdre | Wayai | Meuse |
| Longueur de la rivière (km) | 25 | 56 | 15 | 34 | 8 | 12 |
| Distance de la mer du Nord (km) | 341 | 324 | 376 | 376 | 381 | 366 |
| Distance de la Meuse (km) | 18 | 43 | 34 | 36 | 38 | 3 |
| Distance de la confluence (km) | 18 | 43 | 0,35 | 11,5 | 0,09 | 3 |
| Largeur moyenne (m) | 4,7 | 7,5 | 6.7 | 7.4 | 4.8 | 4.8 |
| Profondeur moyenne (m) | 18,4 | 36,6 | 21,4 | 22,2 | 20,7 | 16,8 |
| Zonation piscicole | Truite | Ombre inférieure | Truite inférieure | Truite supérieure | Truite | Truite |
| Statut trophique | E | E | O | O | O | O |
| Moyenne des paramètres physico-chimiques de 2017-2022 | | | | | | |
| Température (°C) | 11,28 | 11,19 | 10,96 | 10,70 | 10,31 | 10,70 |
| O ₂ (mg/L) | 10,06 | 10,48 | 10,05 | 10,89 | 10,46 | 10,77 |
| GH | 12,73 | 12,14 | 4,53 | 2,89 | 2,79 | 11,92 |
| KH | 6,82 | 8,91 | 3,79 | 2,32 | 2,50 | 7,83 |
| Conductivité (µs/cm) | 611,95 | 590,38 | 226,08 | 152,78 | 112,54 | 550,69 |
| PH | 7,68 | 7,76 | 7,35 | 6,64 | 6,76 | 7,72 |

Tableau 1 : Caractéristiques de rivières étudiées (Nzau Matondo et al., 2020, 2021). Pour le statut trophique, E correspond au caractère Eutrophique et O au caractère Oligo trophique.

2.2. Zone d'étude

Dans cette étude, nous nous sommes focalisés sur des cours d'eau repeuplés en 2017. Tous ces sites ont la particularité de se situer loin de la mer du nord. La Berwinne, la Gueule et l'Oxhe sont des affluents directs de la Meuse. Le Winamplanche est un affluent direct du Wayai et celui-ci se jette dans la Hoëgne. La Hoëgne est un affluent direct de la Vesdre qui se

jette dans l'Ourthe, un affluent direct de la Meuse. Berwinne a un substrat de lit se composant principalement de grosses pierres et de blocs et l'écoulement de type radier est le plus abondant. La Gueule est quant à elle dominée par des substrats de fond de type pierres fines et gravier grossier. L'écoulement le plus fréquent est cette fois-ci le chenal lentique, dû notamment au fait qu'elle soit plus profonde. Des rochers et des blocs caractérisent le fond de Wayai et de la Hoëgne. La Hoëgne et le Winamplanche ont des substrats pauvres en cations alcalins (grès, schistes alumineux et quartz-phyllites) qui expliquent l'acidité de l'eau de ces rivières (Nzau Matondo et al., 2021). Le faciès d'écoulement est déterminé, à l'aide d'une clé



de détermination (Malavoi & Souchon, 2002) et le substrat de fond a été spécifié en mesurant la taille de celui-ci selon la méthode normalisée de Malavoi et Souchon (2002).

Figure 8 : Photos des différentes rivières étudiées avec Berwinne (a), la Gueule (b), le Wayai (c), la Hoëgne (d), le Winamplanche (e) et le l'Oxhe (f).

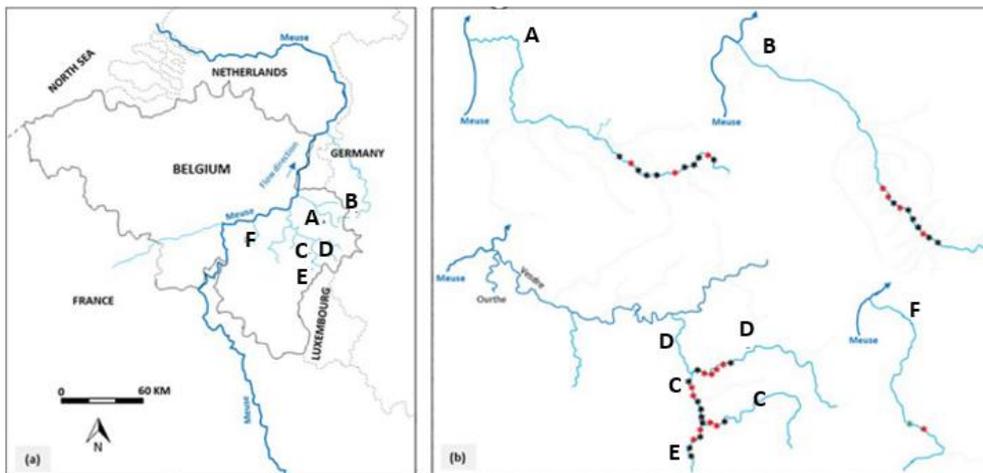


Figure 9 : Carte de la zone d'étude (a) et des sites d'échantillonnage dans les six rivières repeuplées (b). Les six rivières sont la Berwinne (A), la Gueule (B), le Wayai (C), la Hoëgne (D), le Winamplanche (E) et l'Oxhe (F). Le * noir indique les sites de lâchers de civelles non prospectés. Le * rouge indique les sites de lâchers de civelles enquêtés et le * vert indique le site prospecté sans lâcher de civelles (Nzau Matondo et al., 2021).

2.3. Campagne physicochimique



Figure 10: Photo de kit colorimétrique JBL Testlab

Des mesures de température, d'oxygène et de conductivité ont été réalisées directement dans la rivière à l'aide d'un appareil numérique de mesure multiple (Hach HQ30D ; sonde conductivité CDC40103 ; sonde O₂dissous LDO). Tandis qu'un kit colorimétrique JBL Testlab a été nécessaire pour les mesures d'ammonium (NH₄⁺), de nitrate (NO₃⁻), de nitrite (NO₂⁻), de phosphate (PO₄³⁻), de silicium (SiO₂), de fer (Fe), de cuivre (Cu), de dureté carbonatée de l'eau (KH), de dureté de l'eau (GH), de pH et de calcium (Ca²⁺). Ces tests ont été effectués sur des échantillons d'eau prélevés dans la rivière. Ce kit est composé de réactifs pour chaque élément étudié, la couleur obtenue après ajout du ou des réactifs indique l'abondance relative de l'élément dans l'eau. Chaque élément chimique a un protocole (dosage et durée d'attente) qui lui est propre et qui est fourni avec le kit. Pour chaque mesure, la comparaison avec un témoin (eau de rivière sans réactif) est faite pour ne pas biaiser l'expérience. En ce qui concerne le pH, KH et GH le procédé diffère, il faut compter le nombre de gouttes nécessaires pour passer à une teinte spécifique, moyennant utilisation des réactifs, notifiés dans le kit.

2.4. Techniques de suivi post-repeuplement

2.4.1. Pêche électrique

La technique d'échantillonnage par pêche électrique (EFKO, 3,0 kVA) a été utilisée pour capturer les poissons présents dans la zone grâce à un champ électrique et de les marquer afin de pouvoir les identifier et suivre leur histoire de vie. Les pêches électriques avec caractérisation du micro-habitat de l'anguille ont lieu à chaque automne de l'année depuis le déversement des civelles en 2017. De 2017 à 2021, on dénombre cinq campagnes automnales de pêche électrique d'évaluation de l'efficacité du repeuplement au cours desquelles les anguilles marquées sont identifiées et les anguilles non marquées reçoivent leur première



Figure 11 : Anguille marquée avec le système RFID
© Nzau Matondo.

marque RFID. Les anguilles capturées marquées sont ensuite remises à leur site de capture. En 2021, les marquages ont été effectués après les crues de juillet 2021 (Berwinne : 17/09/2021,

Gueule : 13/10/21, Hoëgne : 15/10/2021, Winamplanche : 20/10/2021, Wayai : 22/10/2021, Oxhe : 27/10/2021).

2.4.2. Détection télémétrique

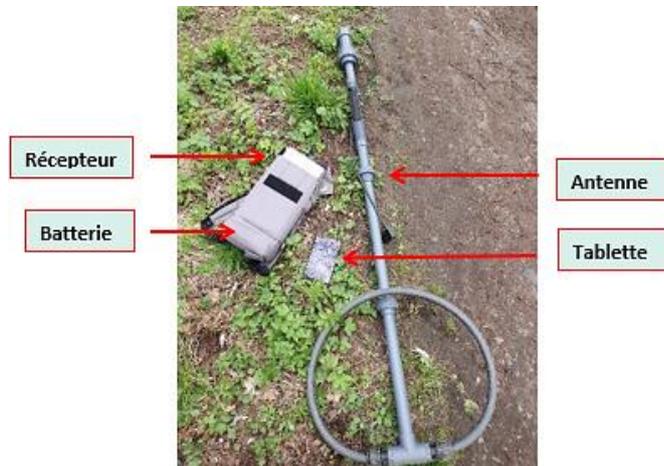


Figure 12 : Photo du matériel RFID

La technique de télémétrie mobile basée sur la détection des anguilles marquées est utilisée à chaque printemps de l'année. Il en découle que de 2018 à 2021, on dénombre 4 sessions télémétriques printanières effectuées. Concernant le matériel utilisé, le transpondeur (Texas Instruments Incorporated), aussi appelé marque, est

considéré comme semi-actif/passif : c'est-à-dire qu'il ne contient pas de batterie, mais peut renvoyer une partie de l'information lorsqu'une interrogation est faite. Cette marque mesure 12*2 mm, pèse 0,095 g et représente <2% de la masse corporelle des anguilles. Afin de détecter ce transpondeur, le système RFID (radiofrequency identification) est utilisé. Ce système est composé d'une antenne, d'un récepteur équipé de Bluetooth, d'une batterie, d'une alarme et d'une tablette, connectée par Bluetooth à l'interrogateur. L'antenne interroge la marque à l'aide d'un champ magnétique, le récepteur reçoit ce signal, sonne et code la réponse reçue, qui peut être lue sur la tablette via le programme BlueTerm+. La détection se fait à maximum 33 cm, le scanning doit être rigoureux pour ne manquer aucune anguille enfouie sous les substrats, les zones profondes, les racines et autres cavités. Afin de tester le bon fonctionnement du dispositif/matériel, une marque témoin est fréquemment testée pendant tout le déroulement d'une session télémétrique.



Figure 13 : Détection des anguilles européenne à l'aide du système RFID

La détection des anguilles est réalisée sur des longs parcours des rivières alevinées en civelles. Ces parcours ont été scannés pour retrouver les anguilles qui pourraient être dispersées sous l'effet de crues. En plus ces rivières ont déjà fait l'objet des pêches de capture-marquage RFID. Le parcours scanné était chaque fois balisé à l'aide d'un décamètre qui était déployé à partir du point/site de déversement de civelles en 2017. Pour chaque

anguille détectée, des mesures du micro-habitat (habitat lié directement à l'individu anguille) sont effectuées : son code est marqué, ainsi que la balise, le substrat de fond, la profondeur, le faciès d'écoulement, la couverture et enfin la position latérale dans la rivière. Le balisage a été effectué à l'aide d'un décamètre, la profondeur a été mesurée avec une mire et la description des faciès d'écoulement et de substrats de fonds ont été réalisés grâce à la méthode de description standardisée des principaux faciès d'écoulements (Malavoi & Souchon, 2002). Ces données sont croisées avec la banque des données antérieures des pêches électriques et des télémétries du LDPH pour établir l'histoire de vie de chaque individu marqué détecté.

2.5. Échelle de dégradation des cours d'eau scannés

L'état de dégradation sous l'effet des crues des parcours scannés a été déterminé en utilisant l'échelle d'évaluation qualitative suivante : La **catégorie I** (rivière non dégradée) est caractérisée par une absence totale de tout signe de dégradation apparente de la rivière. La **catégorie II** (rivière peu dégradée) implique le déplacement de quelques substrats de fond de type blocs. La **catégorie III** (rivière dégradée) montre des phénomènes de déplacement important de substrat de fond (blocs), comblement de certains trous d'eau et modification de faciès d'écoulement mais sans l'homogénéisation du faciès. Enfin, la **catégorie IV** (rivière très dégradée) est utilisée pour un milieu reconstitué par les engins de chantiers directement présents dans le lit du cours d'eau. Il y a dans ce cette dernière catégorie, un déplacement important de substrat de fond (blocs), une uniformisation du faciès d'écoulement avec une perte importante de la diversité de faciès et une uniformisation de la hauteur d'eau (= perte totale de la diversité d'habitats rencontrée dans une rivière naturelle non perturbée par l'homme).

2.6. Comportement et mouvement des anguilles

Les données collectées lors des sessions précédentes de pêches électriques (de 2017-2021) et suivis télémétriques (de 2018-2021) combinées à celles de suivi télémétrique de 2022, permettent de connaître la position des individus à des dates précises. Des paramètres, cités ci-dessous, ont ensuite pu être calculés afin de mieux visualiser et de comprendre les déplacements des anguilles. Parmi les paramètres étudiés, on peut parler de :

- l'**abondance numérique** : représente le nombre d'individus sur un secteur/rivière.

- le **taux de détection** : correspond au nombre d'anguilles marquées détectées divisé par le nombre d'anguilles marquées relâchées.
- la **distance nette parcourue** : est la distance parcourue par l'anguille entre deux localisations successives sur une période donnée ou sur toute la période d'étude (Ovidio et al., 2002) et la **distance nette totale parcourue** correspond à la somme de ces distances nettes. Ici, la distance nette parcourue prend en compte le point exact de détection de l'anguille en 2022 et le point de la dernière détection par télémétrie ou pêche la plus récente.
- le **domaine vital** : correspond à la distance linéaire entre la position la plus en amont et la position la plus en aval de l'anguille pendant une période considérée (Ovidio et al., 2002).
- l'**indice d'exploitation du domaine vital** : correspond au ratio entre la distance totale parcourue et le domaine vital (Ovidio et al., 2002). Selon la position par rapport aux points de marquage et détection des anguilles, il sera également possible de déterminer leurs profils comportementaux et savoir dans quelles catégories elles appartiennent.

Afin de déterminer les caractéristiques du milieu idéal pour ce stade avancé d'anguille (anguille 5+), la couverture, le substrat de fond et le faciès d'écoulement sont notés au moment de la détection de chaque individu. De plus, afin de suivre l'évolution de l'exploitation de l'habitat au fil des années de croissance des anguilles, les données des années précédentes (de télémétrie et de pêche) sont également analysées et utilisées.

2.7. Analyses de données

Après avoir obtenu les données de l'habitat des anguilles (substrats de fond, faciès d'écoulement, couverture, dispersion longitudinale vers l'amont et l'aval et dispersion latérale vers les rives ou le milieu du cours d'eau) des tests de Chi-carré sont effectués afin de comparer les données et de mettre en évidence les caractéristiques de l'habitat idéal ou le plus exploité par le stade étudié de l'anguille. En ce qui concerne les paramètres de mobilité, des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis sont effectués pour mettre en lumière un éventuel effet de « typologie différente entre les rivières ». Le test post hoc de Nemeniy est ensuite utilisé lorsque le test de Kruskal-Wallis est significatif, afin de comparer 2 à 2 les rivières. Ces tests sont effectués sur le logiciel R studio et sont significatifs dans le cas où la valeur de p-value obtenue est inférieure à 0,05.

3. RESULTATS

3.1. Bilan des sessions télémétriques de détection

Au total, 7,7 km (soit environ 6,9 hectares) de rivières, ont été parcourus dans le cadre de ce TFE (Tableau 2). Au cours des sessions télémétriques de 2022, on observe la présence d'anguilles 5+ dans toutes les rivières scannées. Au total, **174 anguilles 5+** ont pu être retrouvées soit un taux de détection total de 17 % des anguilles marquées. Entre les rivières, l'abondance numérique et le taux de détection sont au maximum dans la Berwinne (n = 97, taux de détection = 20 %) et au minimum dans la Hoëgne (n = 7, taux de détection = 8%).

| Cours d'eau | Berwinne | Gueule | Wayai | Hoëgne | Winamplanche | Oxhe |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Résultats généraux | | | | | | |
| Nombre d'anguilles détectées en 2022 | 97 | 16 | 28 | 7 | 11 | 15 |
| Taille moyenne (±écart-type SD) au marquage (mm) | 202±77 | 267±66 | 276±85 | 216±62 | 252±87 | 247±96 |
| Linéaire scannés (m) | 2120 | 450 | 1889 | 1480 | 900 | 800 |
| Secteurs de marquage impliqués lors de la détection | 10 et 2 (plus zones amont et aval) | 1 et 2 (plus zones amont et aval) | 2, 3, 8 et 9 (plus zones amont et aval) | 3 (plus zones amont et aval) | 1 (plus zones amont et aval) | 2 (plus zones amont et aval) |
| Nombre d'anguilles marquées de 2017 à 2021 | 478 | 91 | 185 | 87 | 60 | 150 |
| Taille moyenne (±SD) des anguilles marquées (mm) | 187±85 | 256±116 | 263±105 | 224±66 | 226±67 | 187±81 |
| Taux de détection (%) | 20,3 | 17,6 | 15,1 | 8,0 | 18,3 | 10 |

Tableau 2 : Synthèse des résultats des sessions télémétriques basées sur la détection des anguilles 5+.

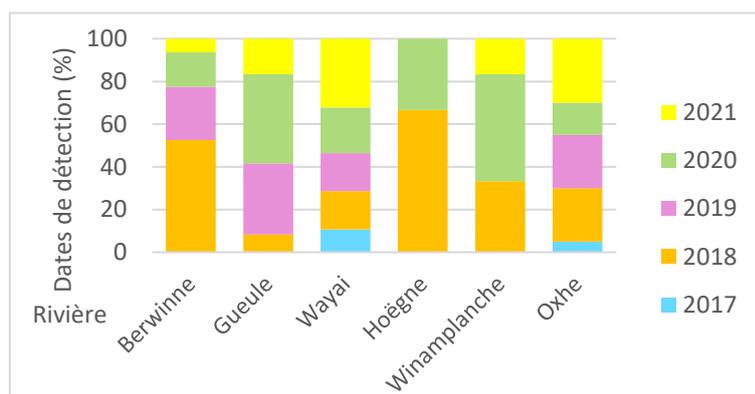


Figure 14: Année de marquage et taux de détection des anguilles en fonction des rivières en 2022.

Les 5 sessions de marquages (de 2017 à 2021) ont été identifiées chez les anguilles 5+ détectées (Figure 14). Dans le Wayai et l'Oxhe, on retrouve des anguilles qui ont été marquées pendant les 5 années de marquage. Le Winamplanche est

caractérisé par la détection des anguilles marquées pendant 3 années (en 2018, 2020 et 2021) et la Hoëgne par 2 années de marquage (2018 et 2020). La Berwinne montre 4 années de marquage (2018, 2019, 2020 et 2021) avec une forte représentation de l'année 2018.

3.2. Caractéristiques physico-chimiques, degré de dégradation de l'habitat et présence d'anguilles

Pendant les sorties de télémétrie, des observations ont également été faites sur le terrain concernant le degré de dégradation des habitats dans les rivières à la suite des inondations de mi-juillet 2021 (Tableau 3). La Berwinne, rivière à forte abondance en anguilles 5+, a été classée dans la catégorie III de l'échelle de dégradation puisqu'elle a subi un déplacement important des blocs, une perte de profondeur à certains endroits et une modification des faciès d'écoulements. La Gueule, l'Oxhe et le Winamplanche sont considérées de niveau II, du fait que ces rivières étaient moins impactées par les crues et donc peu dégradées, montrant seulement le déplacement de quelques substrats de fond de type blocs. Le Wayai et la Hoëgne sont de la catégorie la plus impactée, la catégorie IV correspondant au niveau le plus élevé de l'échelle de dégradation, on y observe un déplacement important des blocs, une uniformisation du faciès d'écoulement avec une perte importante de leur diversité et une uniformisation de la hauteur d'eau, le tout aggravé par l'intervention des engins de chantiers pour reconstituer/reconsolider les berges. Dans cette diversité de degré de dégradation de l'habitat, de la catégorie II à IV, les anguilles 5+ ont toujours été présentes.

| Cours d'eau | Berwinne | Gueule | Wayai | Hoëgne | Winamplanche | Oxhe |
|--|----------|--------|-------|--------|--------------|-------|
| Paramètres physico-chimiques 2022 | | | | | | |
| Température (°C) | 8,8 | 11,1 | 10,3 | 10 | 9,3 | 8,9 |
| O2 (mg/L) | 11,24 | 10,08 | 9,45 | 10,37 | 10,67 | 11,27 |
| GH | 12 | 13 | 2 | 5 | 2 | 16 |
| KH | 8 | 10 | 3 | 2 | 2 | 11 |
| Conductivité (µs/cm) | 506 | 586 | 211 | 189,9 | 116,9 | 556 |
| PH | 7,8 | 8 | 7,4 | 6,4 | 7 | 8 |
| Dégradation des habitats | | | | | | |
| Catégories de dégradation | III | II | IV | IV | II | II |
| Nombre d'anguilles détectée | 97 | 16 | 28 | 7 | 11 | 15 |

Tableau 3 : Paramètres physico-chimiques, dégradation de l'habitat et présence d'anguilles 5+.

Lors de la campagne télémétrique de 2022, sur le plan physico-chimique, les anguilles 5+ ont également été trouvées dans une large gamme de variations des valeurs au niveau de chaque paramètre physico-chimique. On retrouve des anguilles 5+ dans des rivières aux typologies physico-chimiques très variées comme : 2 à 16° de dureté de l'eau (GH), 2 à 11° de dureté carbonatée (KH), eau au pH légèrement acide (6,4) à pH alcalin (8), et 116,9 à 586 µs/cm de conductivité.

3.3. Paramètres de mobilité et profils comportementaux

Les données acquises lors des pêches électriques et lors des campagnes télémétriques ont été utilisées pour retracer les déplacements de chaque anguille détectée en 2022. Au total, 603 données de 4 sessions télémétriques collectées de 2018-2021 et 1738 données de 5 sessions de pêches de 2017-2021 ont été croisées avec nos données de télémétrie 2022 (Tableau 5 et Tableau 6). Les résultats obtenus ont montré que la distance nette parcourue est en fonction de la typologie des rivières (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 16.875$, ddl = 5, $p = 0.004743$) (Figure 15). Elle est significativement plus élevée dans la Hoëgne, rivière légèrement acide (moyenne de 425,9 m) très dégradée après les crues, que dans la Gueule et l'Oxhe, 2 rivières alcalines (moyennes respectives de 12,1 et 41,3 m). Entre la Hoëgne et la Gueule, le test de Nemeniy met bien en évidence une différence significative ($p = 0,0019$). C'est également le cas entre la Hoëgne de l'Oxhe ($p = 0,0492$).

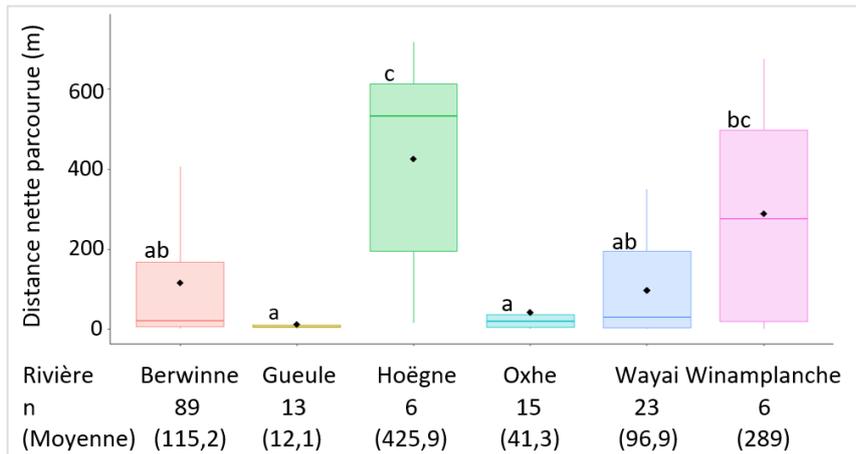


Figure 15 : Distance nette parcourue (en m). Les lettres différentes indiquent les différences significatives. La première barre horizontale, en partant du haut, des boîtes à moustache correspond au 3^{ème} quartile. La deuxième barre horizontale correspond à la médiane et la troisième au 1^{er} quartile. Le losange noir représente la moyenne et les points correspondent aux valeurs. Le n indique le nombre d'anguilles, il est identique pour les autres boîtes à moustaches de ce TFE.

Les anguilles ont des domaines vitaux différents en fonction des rivières (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 25.896$, ddl = 5, $p = 9.346e-05$) (Figure 16a). Les anguilles de la Berwinne et du Winamplanche ont des domaines vitaux plus élevés (moyennes de 122,5 et de 291,9 m) que celles présentes dans la Gueule (moyenne de 16,8 m). Ces différences sont significatives, entre la Berwinne et la Gueule (Nemeniy, $p = 0,004$) et entre le Winamplanche et la Gueule ($p = 0,0396$). La distance totale parcourue par les anguilles 5+ (Figure 16b) ainsi que l'indice d'exploitation du domaine vital (Figure 16c) sont également différentes entre les rivières (Distance totale parcourue: Kruskal-Wallis $\chi^2 = 18.809$, ddl = 5, $p = 0,002086$ et Indice d'exploitation : Kruskal-Wallis $\chi^2 = 18.756$, ddl = 5, $p = 0,002134$). La distance totale parcourue par les anguilles 5+ ainsi que leurs

indices d'exploitation du domaine vital sont significativement plus élevés dans l'Hoëgne que dans les autres rivières.

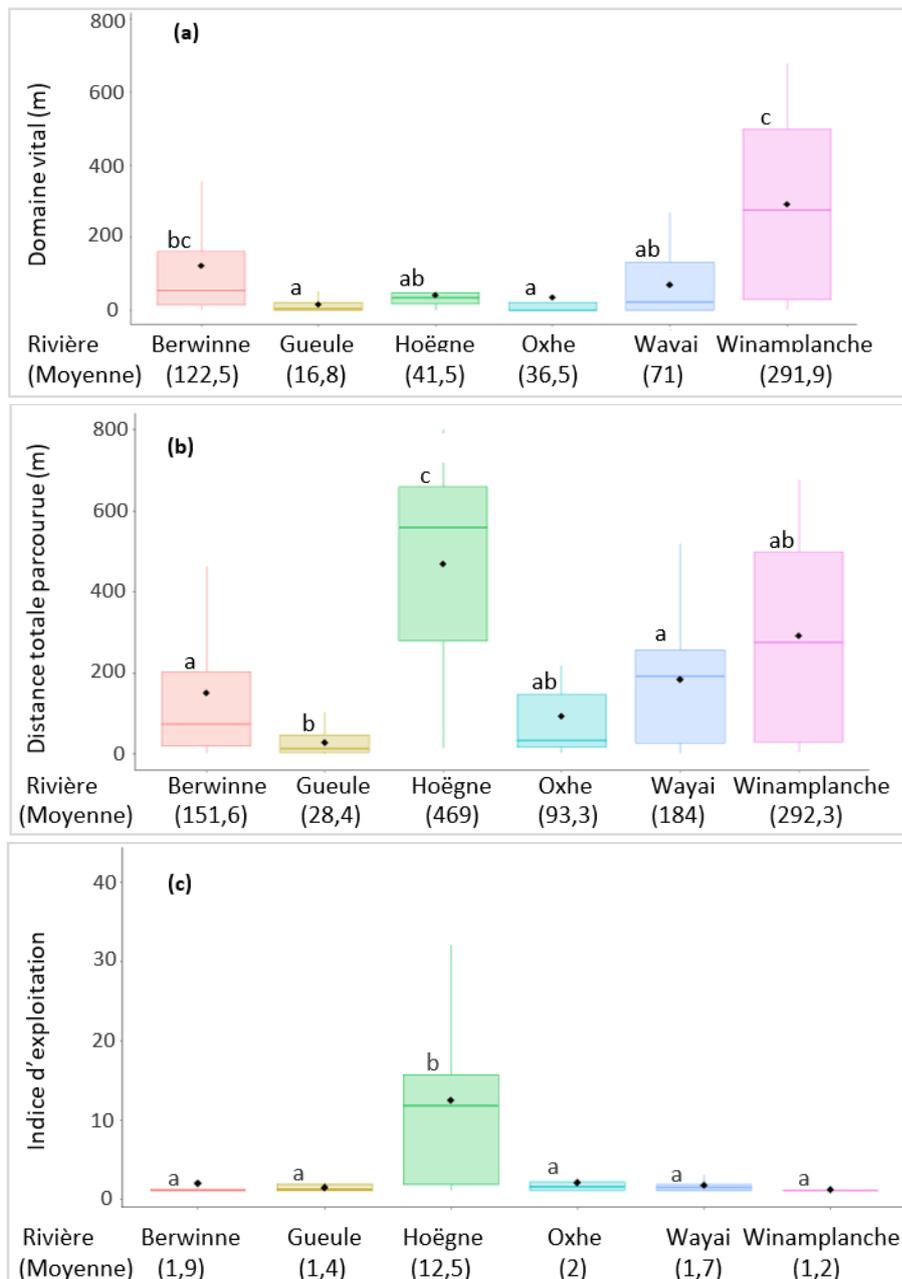


Figure 16 : (a) *Domaine vital (m)*, (b) *Distance totale parcourue (m)*, (c) *Indice d'exploitation*. Les lettres différentes indiquent les différences significatives. La première barre horizontale, en partant du haut, des boîtes à moustache correspond au 3^{ème} quartile. La deuxième barre horizontale correspond à la médiane et la troisième au 1^{er} quartile. Le losange noir représente la moyenne et les points correspondent aux valeurs.

Toutes rivières confondues, cinq profils comportementaux ont été observés. Ce sont les oscillants ascendants qui dominent les rivières (41 % soit n=61 anguilles 5+) puis les oscillants descendants (35 %, n=53 anguilles), les descendants (13 %, n=20 anguilles), les ascendants (7 %, n = 11) et enfin les stationnaires (4 %, n = 6) (Figure 17b). Les rivières ne présentent pas les mêmes profils comportementaux et sont assez hétérogènes (Figure 17a). La Berwinne, la

Gueule et le Wayai présentent les 5 profils. La Berwinne montre une dominance des individus de type oscillants ascendants. Des individus ascendants dominent dans la Gueule et des individus oscillants descendants dans le Wayai. Le Winamplanche et l'Oxhe ne présentent que 3 profils comportementaux différents, avec respectivement une dominance pour les individus oscillants ascendants et pour les individus oscillants descendants. La Hoëgne ne présente que 2 profils comportementaux avec une dominance par les oscillants descendants.

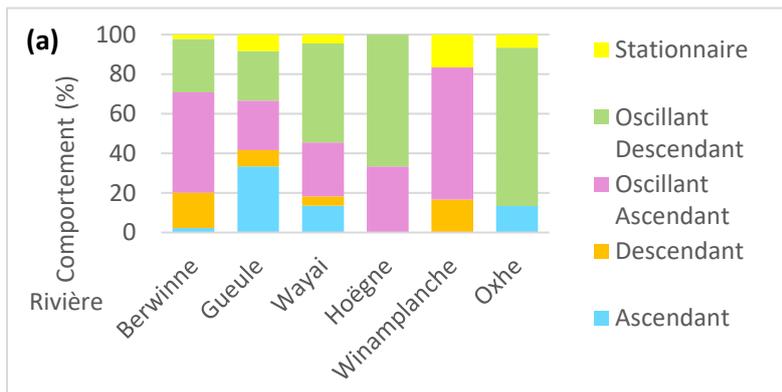
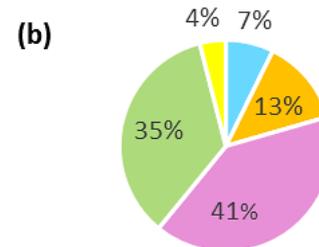


Figure 17 : Profils comportementaux des anguilles en (a) par rivière et en (b) toutes les rivières confondues.



3.4. Dispersion des anguilles

3.4.1. Dispersion latérale

Les anguilles se trouvent majoritairement près des rives dans toutes les rivières, en moyenne dans 76 % des cas ($\chi^2 = 44,024$, ddl = 1, $p = 3 ; 244e-11$) (Figure 18).

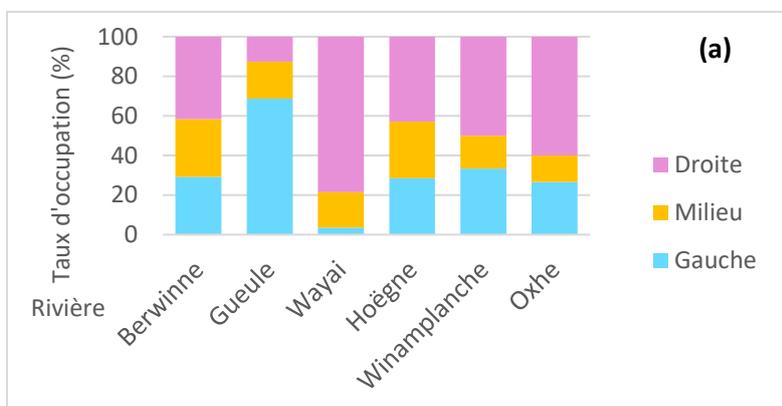
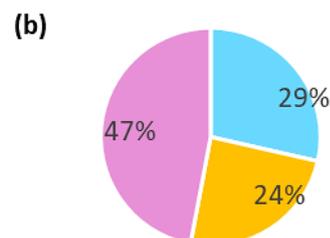
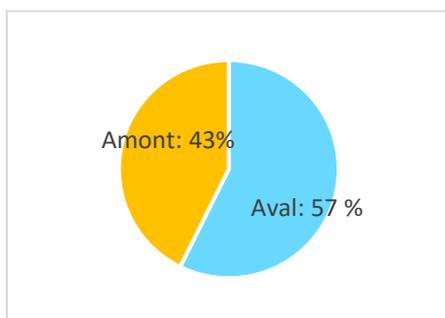


Figure 18 : Dispersion latérale (en m) des anguilles en (a) par rivière et en (b) toutes les rivières confondues.



3.4.2. Dispersion longitudinale



Les anguilles 5+ détectées, toutes les rivières confondues, ont été trouvées en amont et en aval ($\chi^2 = 3.5122$, ddl = 1, $p = 0.06092$) par rapport au point « 0 » de déversement des civelles (Figure 19).

Figure 19 : Dispersion longitudinale des anguilles toutes rivières confondues.

On note néanmoins une différence de profil de dispersion longitudinale entre les rivières (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 35.09$, ddl = 5, $p = 1.443e-06$). Les anguilles 5+ ont été détectées en amont et en aval par rapport point « 0 » dans la Berwinne, la Gueule, la Hoëgne et le Wayai. Elles ont été exclusivement trouvées en aval dans l'Oxhe et en amont dans le Winamplanche (Figure 20). La position de dispersion longitudinale moyenne des anguilles 5+ dans la Hoëgne (-482 m) est une position très aval par rapport à celles des autres rivières. Les moyennes de dispersions longitudinales des anguilles 5+ de la Berwinne (+53 m) et du Winamplanche (+270 m) indiquent une position moyenne située en amont tandis que celles de la Hoëgne (-482 m), de l'Oxhe (-205 m), de la Gueule (-10 m) et du Wayai (-6 m) montrent une position en aval. Les valeurs des tests de Nemeniy significatifs sont les suivantes, entre la Berwinne et la Hoëgne : $p = 0,03448$, entre la Berwinne et l'Oxhe : $p = 4,5e-05$, entre le Winamplanche et la Hoëgne : $p = 0,00383$, entre le Winamplanche et l'Oxhe : $p = 0,00013$ et enfin entre la Gueule et l'Oxhe : $p = 0,00778$).

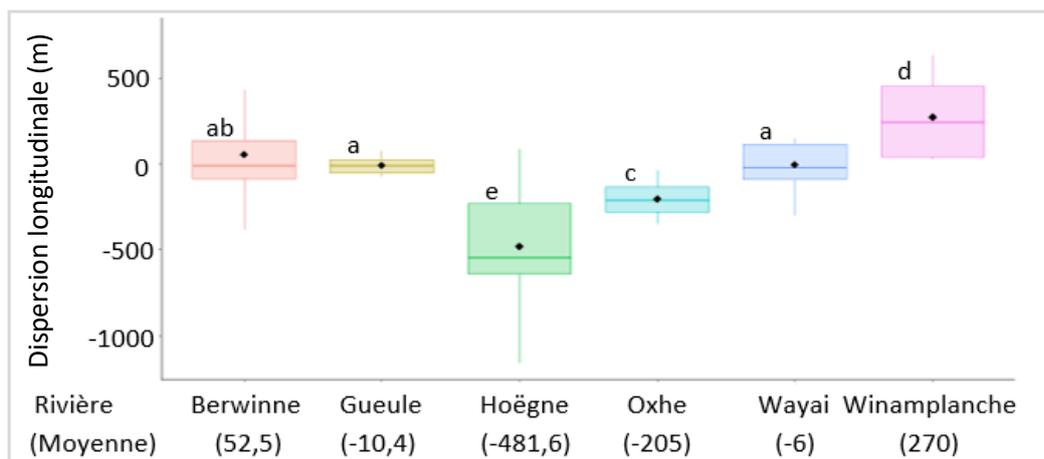


Figure 20 : Dispersion longitudinale (en m) à partir du point 0 des anguilles repeuplées. Les lettres différentes indiquent les différences significatives. La première barre horizontale, en partant du haut, des boîtes à moustache correspond au 3^{ème} quartile. La deuxième barre horizontale correspond à la médiane et la troisième au 1^{er} quartile. Le losange noir représente la moyenne et les points correspondent aux valeurs.

3.5. Utilisation de l'habitat

3.5.1. Substrat de fond

Les résultats d'utilisation des substrats de fond montrent que le bloc demeure le substrat de fond le plus utilisé par les anguilles 5+, toutes les rivières confondues. Son taux d'utilisation représente 76 % (129 anguilles 5+). Le substrat racine arrive en deuxième position avec 21 % (n = 36) de taux d'utilisation et est l'habitat le plus utilisé dans la Gueule (Figure 21a). Les anguilles 5+ présentent un taux d'utilisation des blocs significativement plus élevé que celui d'utilisation des racines (Chi-carré $\chi^2 = 63,291$, ddl = 1, $p < 1,783e-15$). Les rochers et

pierres grossières ne représentent respectivement que 1 et 2 % (n=1 et 3 anguilles 5+) du taux d'utilisation (Figure 21b).

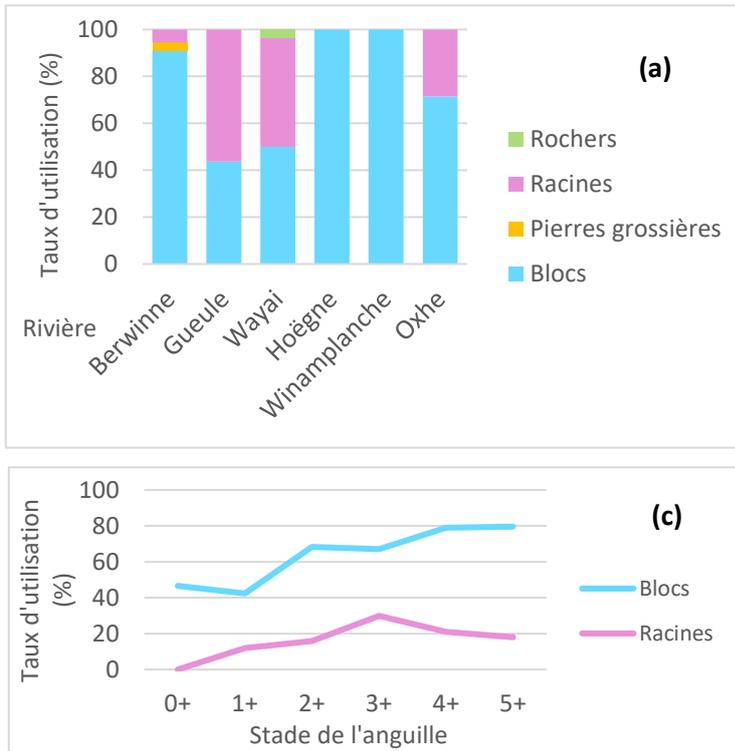


Figure 21 : (a) Taux d'utilisation des différents substrats de fond en fonction des rivières. (b) toutes rivières confondues. (c) Relation entre le stade de vie et l'utilisation des substrats les plus exploités.

Avec la croissance, les anguilles utilisent de plus en plus les blocs. L'utilisation des racines vient en deuxième position après l'utilisation des blocs (Figure 21c).

3.5.2. Faciès d'écoulement

Concernant les faciès d'écoulement, les anguilles 5+ sont capables d'utiliser une grande diversité de faciès (Figure 22a). Les deux principaux faciès utilisés par les anguilles sont le plat courant avec 75 % (n=122 anguilles 5+) et le plat lenticulaire avec 11 % (n=18) de taux d'utilisation (Figure 22b). La répartition d'utilisation entre ces deux faciès est significativement (Chi-carré $\chi^2 = 77.257$, ddl = 1, $p < 2,2 \times 10^{-16}$) en faveur du faciès de type plat courant. Au sein des différentes rivières, le plat courant domine, excepté dans la Gueule où le chenal lotique est très exploité (Figure 22a).

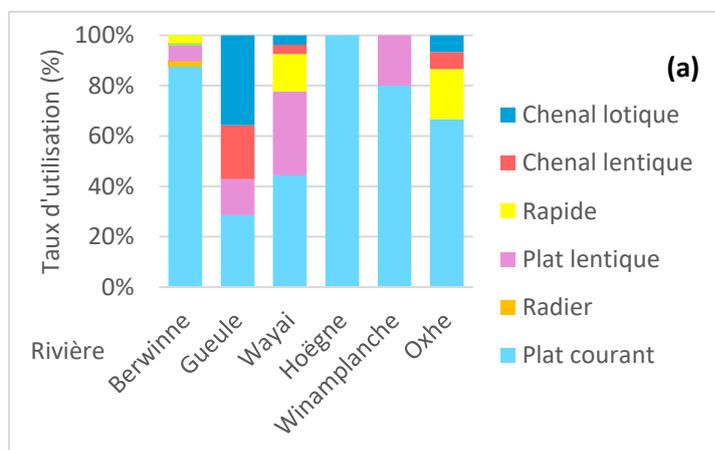
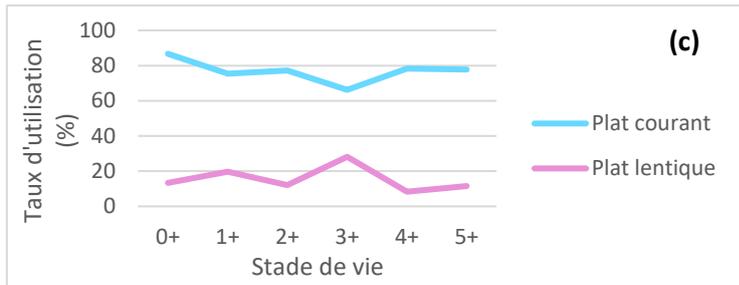


Figure 22 : Utilisation des différents faciès d'écoulement par les anguilles par rivière (a) et toutes rivières confondues (b). (c) Relation entre le stade de vie et l'utilisation des faciès d'écoulement les plus exploités.



Au fil de la croissance des anguilles, l'utilisation de plat courant reste très élevée tandis que l'utilisation du plat lentique demeure basse (Figure 22c)

3.5.3. Profondeur

La profondeur de détection des anguilles 5+ est significativement différente entre les rivières (Kruskal-Wallis $\chi^2=26.263$, ddl = 5, $p = 7.935e-05$) (Figure 23). Le test de Nemeniy met en évidence que c'est au niveau de la Gueule que les profondeurs de détection sont les plus élevées (moyenne de 61,4 cm) et diffèrent significativement de celles dans la Berwinne ($p = 0,001$) (moyenne = 37,8 cm), la Hoëgne ($p = 0,0150$) (moyenne = 31,1 cm) et le Wayai ($p = 1e-05$) (moyenne = 30,6 cm). Toutes les rivières confondues, on note que les anguilles 5+ se retrouvent principalement à une profondeur inférieure à 45 cm ($n = 122$) contre seulement $n = 38$ entre 45 et 105 cm (Figure 24).

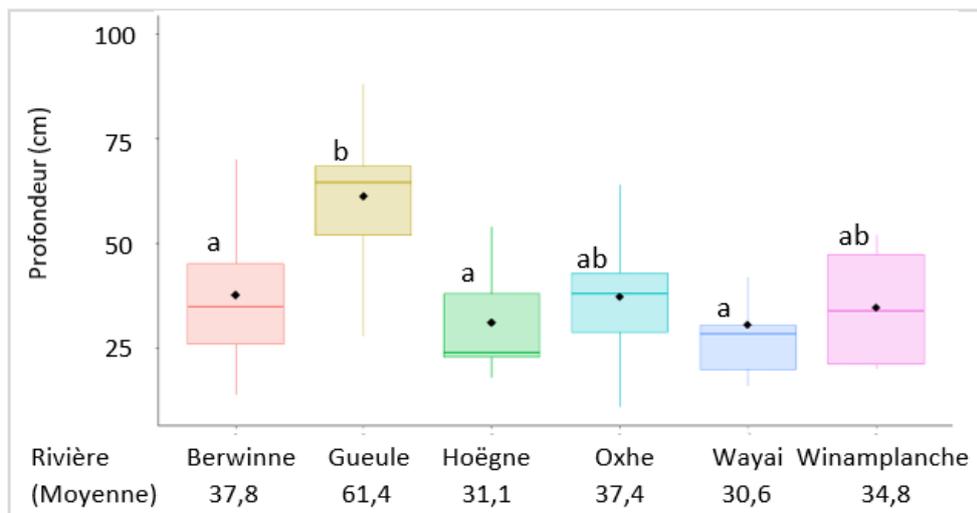


Figure 23 : Profondeur de détection des anguilles (en cm) en fonction des rivières. Les lettres différentes indiquent les différences significatives. La première barre horizontale, en partant du haut, des boîtes à moustache correspond au 3^{ème} quartile. La deuxième barre horizontale correspond à la médiane et la troisième au 1^{er} quartile. Le losange noir représente la moyenne et les points correspondent aux valeurs.

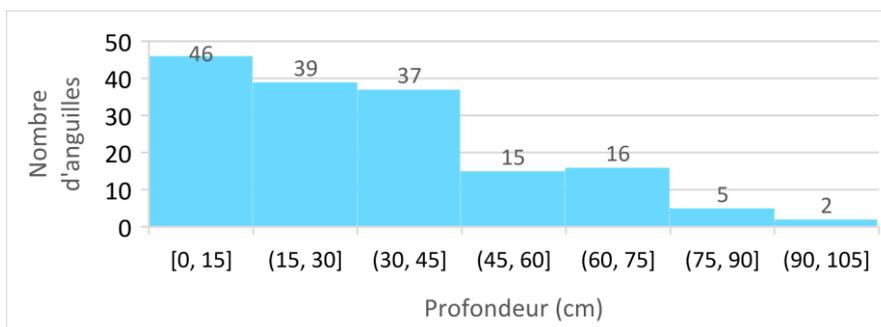


Figure 24: Utilisation de profondeur par les anguilles, toutes rivières confondues.

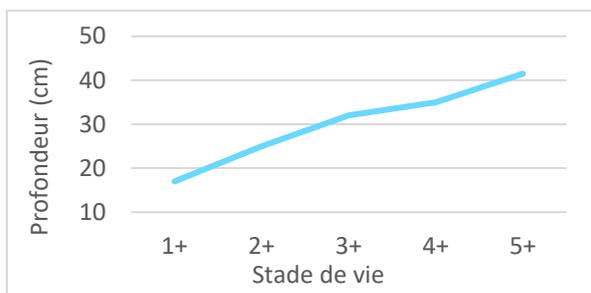


Figure 25: Exploitation de la profondeur en fonction des stades de vie de l'anguille européenne

Au cours de leur stade de vie, les anguilles 5+ vivent de plus en plus en profondeur. La profondeur moyenne à l'âge 1+ est de 17 cm tandis qu'elle est de 41,5 à l'âge 5+ (Figure 25).

3.5.4. Couverture

Les anguilles 5+ se trouvent majoritairement, à 92 % soit 153 anguilles, dans les zones où la couverture végétale est présente et à 5 % dans les zones non couvertes (Figure 26). Il existe bel et bien une forte utilisation des habitats avec couvertures végétales, par rapport aux zones sans couvertures (Chi-carré $\chi^2 = 135.91$, ddl = 1, $p < 2.2e-16$). Dans toutes les rivières, c'est la couverture végétale qui domine et elle est même la seule couverture utilisée dans la Gueule, l'Oxhe et le Winamplanche. Dans la Berwinne et le Wayai, les anguilles 5+ ont été détectées dans des habitats couverts par la végétation et les ponts ainsi que dans des habitats non couverts. Dans la Hoëgne, les anguilles ont été détectées dans des habitats non couverts et des habitats couverts par la végétation (Figure 26b).

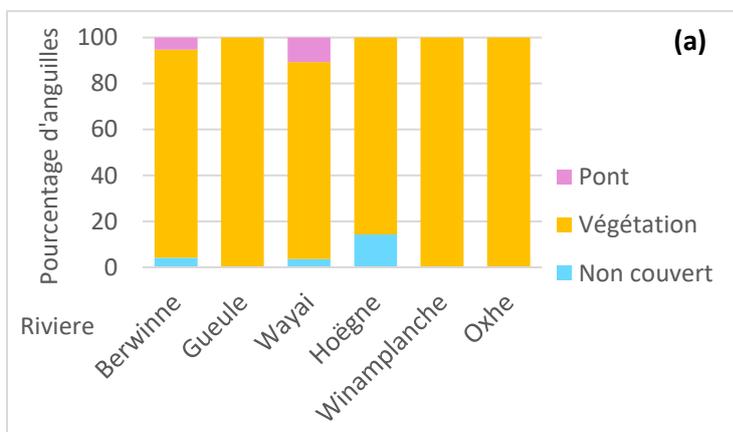
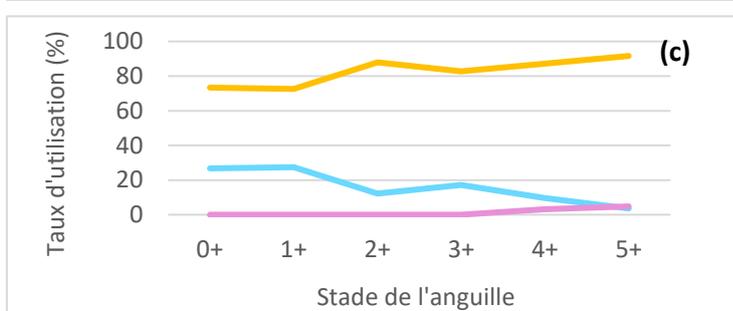
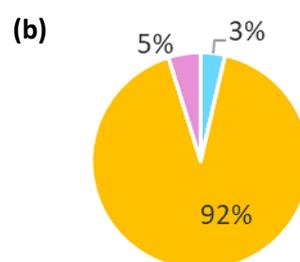


Figure 26 : Couverture des habitats des anguilles 5+ par rivière (a) et toutes rivières confondues (b). (c) Relation entre les stades de vie et la couverture.



Concernant l'évolution entre les différents stades de vie, on remarque que le taux d'utilisation de zones non couvertes est en nette baisse avec la croissance. Une augmentation de l'utilisation des zones avec couverture végétale est observée (Figure 26c).

zones avec couverture végétale est observée (Figure 26c).

4. DISCUSSION

4.1. Performance de la méthodologie de détection mobile sur des longs parcours de rivière

Avec $n = 174$ anguilles 5+ détectées et un taux de détection de 17 % des anguilles marquées observés sur un linéaire de 7,7 km, la méthodologie utilisée de télémétrie mobile basée sur la détection des anguilles marquées dispersées (après un épisode de crues et d'altération des habitats) sur de longs linéaires de rivières a été un vrai succès. Ce succès est soutenu par l'abondance numérique des anguilles 5+ détectées qui est bien supérieure à celles observées pendant les stades antérieurs d'anguilles de 1+ ($n = 39$ anguilles détectées, linéaire 1,6 km : Colson, 2018) ; 2+ ($n = 167$, linéaire 4,2 km : Ali Abdou, 2019) et 4+ ($n = 100$, linéaire 3,8 km : Dupuy, 2021) excepté pour le stade d'anguilles 3+ ($n = 213$, linéaire 4,1 km : Amoussou, 2020) où l'abondance numérique est supérieure à celle des anguilles 5+. En revanche, en termes d'abondance relative exprimée en nombre d'anguilles au Km, on observe en télémétrie étendue en 2022, 23 anguilles 5+ au km, laquelle abondance relative est inférieure à celles rapportées dans les stades antérieurs (anguilles/km : 1+ = 24 ; 2+ = 40 ; 3+ = 52 et 4+ = 26) mais très proche de celle des anguilles 1+. Les performances d'abondance d'anguilles de stades antérieurs au stade 5+ pourraient être encore supérieures à celles rapportées, et même bien au-dessus à la performance de 2022 si les linéaires scannés étaient étendus. Ceci montre l'importance d'ouvrir/étendre les parcours à scanner pour retrouver les anguilles perdues et installées hors des secteurs régulièrement inspectés. La méthodologie étendue présente cependant les défauts d'exiger plus d'effort humain (plus d'heures de travail), pour scanner de longs linéaires.

Comparé à d'autres méthodologies d'études sur les anguilles en rivière, le taux de détection de 17 % observé est dans les limites supérieures des performances liées à l'utilisation de la technique de capture-marquage-recapture (taux de recapture = 0 - 18,5 % : Baras et al., 1996; Naismith & Knights, 1988; Nzau Matondo et al., 2017; White & Knights, 1997). Le taux de détection obtenu en 2022 est cependant inférieur à celui, cité dans la littérature, concernant la télémétrie de détection basée sur l'utilisation des antennes fixes (taux de détection = 27,6 - 37,5 % : Nzau Matondo et al., 2017; Nzau Matondo & Ovidio, 2018). La portabilité du système de télémétrie mobile RFID en 2022 explique son succès de performance par rapport à l'utilisation de la technique de capture-marque. Elle permet une

recherche active des individus pour détecter tous les individus présents dans les secteurs scannés, et même la détection des individus immobiles sédentaires enfouis sous les substrats que le système de télémétrie fixe est incapable de détecter. La supériorité rapportée du système fixe s'explique par le stade particulier des anguilles détectées, il s'agit des anguilles jaunes en situation active de colonisation ascendante depuis la mer, ce stade très mobile est facilement détecté par les antennes fixes qui restent actives en permanence. Il est alors intéressant de pouvoir combiner ces deux systèmes de télémétrie pour avoir des informations à la fois sur la fraction migrante de la population et sur la fraction sédentaire. La méthode de capture-marquage-recapture nécessite quant à elle la prise en main de l'anguille lorsque la télémétrie mobile RFID n'a pas besoin de capturer les individus. Connaissant le caractère cryptique et discret de l'anguille et l'accessibilité à pied des cours d'eau étudiés, le système de télémétrie mobile reste le plus adapté pour comprendre la phase de vie continentale de l'anguille, mais il est inapproprié et inadapté pour les milieux profonds. La télémétrie radio est également bien adaptée, car elle permet la détection continue et à longue distance des anguilles (Ovidio et al., 2013). Les inconvénients de cette méthode sont qu'il est impossible de marquer les jeunes stades et que son prix est plus élevé. Il est néanmoins possible de l'envisager comme technique complémentaire.

Rappelons que 17 % des anguilles 5+ ont été détectées et 83 % d'anguilles 5+ ne l'ont pas été. Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer la non-détection de 83 % d'anguilles 5+ marquées. Parmi ces hypothèses, il y a les déplacements des anguilles 5+ dans des zones plus éloignées, hors des secteurs de détection, pour rechercher des habitats plus productifs qui devraient permettre une bonne accumulation des réserves lipidiques en vue de leur migration de dévalaison à venir. Les crues du 14 au 16 juillet 2021 ont détruit les habitats, ayant possiblement provoqué le déplacement et/ou l'émigration des individus anguilles (Piniewski et al., 2017) à la recherche de nouveaux abris après modification/destruction de leurs habitats. Une autre raison à cette non-détection d'une grande partie des anguilles marquées peut être la portée de détection très faible (30 cm) du système de télémétrie mobile utilisé. Il est donc possible que la détection des individus soit plus faible dans les milieux profonds et chez les individus profondément enterrés dans des cavités et abris. De plus, la méthodologie de détection utilisée n'implique que la détermination de la présence de la fraction marquée d'anguilles et la fraction non marquée n'est pas repérée. Cela implique que

la non-détection d'anguille 5+ ne signifie pas forcément l'absence d'anguilles 5+ dans ces zones et l'abondance réelle des anguilles 5+ pourrait donc être plus élevée que l'abondance apparente rapportée par l'étude de télémétrie. La disponibilité de l'examineur doit être prise en compte, car une étude en continu (24/24h) ainsi que l'étude nocturne (espèce active) sont impossibles à réaliser dans la durée avec le système de télémétrie mobile. Il est également possible que les anguilles 5+ aient subi une mortalité liée à la prédation par des poissons et oiseaux piscivores, mais également par l'homme avec la pêche illégale. Enfin, il faut prendre en compte que la perte du transpondeur est toujours possible et qu'elle ne soit pas détectée si elle survient hors de portée du détecteur.

4.2. Flexibilité d'exploitation des macro-habitats variés et capacité de résilience de l'espèce

Au cours de cette étude, les anguilles 5+ ont été détectées dans les 6 rivières étudiées, malgré leurs différences d'un point de vue physico-chimiques, catégories de dégradation de l'habitat et caractéristiques hydromorphologiques (couverture, faciès d'écoulement, substrat de fond). La présence de ces anguilles 5+ suggèrent une bonne aptitude de l'espèce à s'adapter à une grande diversité typologique de macro habitats/rivières. L'espèce est très flexible d'un point de vue exploitation des macro-habitats/rivières. Elle peut vivre dans des rivières aux caractéristiques très variées allant des rivières légèrement acides (pH=6,4) aux rivières alcalines (pH=8), avec une dureté de l'eau très variée allant de type extrêmement douce (2°) au type extrêmement dure (16°) et une gamme très étendue de conductivité de 116,9 à 586 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Le stade anguille 5+ de l'espèce, a été également détecté dans des macro-habitats/rivières aux catégories de dégradation de l'habitat post crues très variées, allant de la catégorie II (rivière peu dégradée) à la catégorie IV (rivière très dégradée avec effet aggravant de destruction des habitats liés à la présence des engins de chantier directement dans le cours d'eau). Même dans les tronçons de rivières les plus impactés par la destruction de l'habitat (catégorie IV dans l'échelle de dégradation), comme sur le tronçon de Wayai aval à Spixhe (n = 1 anguille détectée sur un total de 29) et le tronçon de Hoëgne aval (n = 3 anguilles détectées sur un total de 7), on a retrouvé des anguilles 5+. Ceci démontre la forte capacité de résilience de l'espèce qui est capable de résister à l'altération et à la destruction de l'habitat après un épisode de crues dévastatrices pour l'écosystème entier. Cette forte capacité de résistance serait liée à l'adaptation biologique très rapide de l'anguille à un nouvel

environnement et la flexibilité écologique de l'espèce d'un point de vue de l'exploitation de l'habitat se traduisant par une utilisation aisée des micro-habitats cryptiques de substitution comme le passage observé de l'utilisation des micro-habitats faits d'assemblages des blocs (= situation avant les crues) vers l'utilisation des micro-habitats cryptiques faits de racines situées dans les sous-berges (= situation après les crues). Le cas le plus frappant à la fois de cette flexibilité de l'habitat et de la forte capacité de résilience de l'espèce, a été observé sur le tronçon de Wayai à Spa (n=28 anguilles 5+) où a eu lieu la détection de la majorité d'anguilles 5+ du Wayai (n total = 29). La forte capacité de résilience de l'espèce est également soutenue par la représentation de toutes les années de marquage (de 2017 à 2021) parmi les anguilles détectées en post-crues.

4.3. Indicateurs de mobilité

La comparaison des indicateurs de mobilité entre ceux observés avant les crues chez les anguilles 4+ au printemps 2021 (Dupuy, 2021) et ceux après les épisodes de crues chez les anguilles 5+ au printemps 2022 (cette étude) montre des valeurs supérieures en post crues comme le témoignent les valeurs élevées de distance nette parcourue (DNP, 2021/2022 : moyenne = 39 m/115 m), distance totale parcourue (DTP, moyenne = 81 m/160 m)), domaine vital (DV, moyenne = 58 m/101 m)) et indice d'exploitation du domaine vital (IE, moyenne = 1,3 /3,5. Ces valeurs traduisent la mobilité élevée après les crues chez les anguilles 5+, laquelle serait facilitée par l'action de fortes crues qui ont détruits les habitats et la nécessité de rechercher de nouveaux habitats toujours plus productifs. Parmi les 6 rivières, ce type de mobilité élevée est très marqué via des valeurs supérieures de DTP, DNP et IE dans la catégorie IV de rivière très dégradée comme la Hoëgne, la rivière la plus impactée par les crues et les travaux de génie civil de réparation des berges et modification du lit. Cette mobilité élevée s'expliquerait par la destruction des habitats par les crues d'été 2021 et aggravée par les engins de travaux dans le lit de la rivière.

4.4. Comportement

Bien que les anguilles se voient forcer d'utiliser des nouveaux habitats aquatiques lors des repeuplements, tous les profils comportementaux d'individus repeuplés précédemment identifiés (ascendants, descendants, oscillants ascendants ou descendants et stationnaires)(Nzau Matondo et al., 2019) dans les stades d'anguilles de 1+ à 4+ ont été également retrouvés chez les anguilles 5+ détectées lors de la campagne télémétrique de

2022. On observe en revanche une minorité, soit **4 %**, les anguilles stationnaires tandis que les **96 %** restants sont en mouvement. Ces mouvements importants parmi les anguilles dans les rivières sont ici mis en relation, sans doute avec la recherche d'un habitat optimal pour leur croissance et survie. De plus, les profils comportementaux sont hétérogènes entre les rivières, ce qui démontre que le cours d'eau, en particulier sa capacité d'accueil, exerce une influence sur l'expression comportementale des anguilles. C'est dans la Berwinne, la Gueule et le Wayai, les 3 rivières à abondance numérique élevée en anguilles, traduisant une capacité d'accueil et attractivité plus élevées, que la diversité comportementale est maximale.

En 2020 et en 2021, le déplacement ascendant, regroupant le comportement de type ascendant et celui de type oscillant ascendant, dominait parmi les individus détectés (**51,8 %** des anguilles 3+ : Amoussou, 2020 et **62 %** des anguilles 4+ : Dupuy, 2021). En 2022, on retrouve parmi les individus 5+ détectés autant d'individus ayant un déplacement ascendant (48 %) que ceux ayant un déplacement descendant (48 %). Cette augmentation du déplacement descendant par rapport au déplacement ascendant peut être expliquée par le fait que les anguilles déversées sont en 2022 à leur 6^{ème} année de vie en rivières et que certains individus peuvent être au début de processus hâtif de métamorphose de l'anguille jaune en anguille argentée et commencent leur migration de dévalaison. A contrario, les stades plus jeunes comme les civelles et les anguillettes, sont plutôt caractérisés par un comportement de colonisation intense vers l'amont des rivières par effet de densité dépendance (Ibbotson et al., 2002). Une autre hypothèse à cette augmentation du taux de descendant serait que les crues de juillet 2021 en Wallonie auraient déplacé, par de forts courants, les individus vers l'aval des rivières. Il y a également l'action de destruction des habitats par les travaux dans la rivière ayant forcé les anguilles à descendre la rivière pour rechercher d'autres habitats dans des tronçons les moins altérés comme c'est le cas évoqué dans la Hoëgne. Dans le Winamplanche, on observe une forte différence de profils comportementaux entre 2021 (anguilles 4+) et 2022 (anguilles 5+). Au sein de cette rivière, les anguilles 4+ sont tous de type stationnaire alors que les anguilles 5+ ont une majorité de profils de type ascendant. Cette observation s'expliquerait également par l'extension vers l'amont du linéaire scanné et la détection de nouveaux individus marqués ayant été longtemps non détectés.

4.5. Dispersion

Il a auparavant été mis en évidence que les anguilles 0+, 1+, 2+, 3+ et 4+ se dispersent à la fois vers l'amont et vers l'aval des rivières (Ali Abdou, 2019; Amoussou, 2020; Colson, 2018; Dupuy, 2021). Les résultats télémétriques de 2022 permettent de confirmer que les anguilles 5+ en sont-elles aussi capables (**57** % en aval et **43** % en amont). Cette exploration bidirectionnelle des rivières permet aux anguilles de rechercher des habitats intéressants au niveau bio-énergétique. De plus, l'utilisation élevée des habitats près de rives au détriment de ceux du centre des rivières est également liée à la notion d'économie d'énergie et de protection contre les gros poissons prédateurs. Le courant est beaucoup plus intense au centre des rivières que près de rives, impliquant une nage continue de l'espèce et une grande dépense d'énergie. Les rives sont quant à elle riches en abris de qualité (sous-berges, racines, assemblages de blocs) qui sont de réels refuges contre le courant et les prédateurs et offrent une efficacité maximale de prise alimentaire (Ovidio et al., 2015).

4.6. Utilisation de l'habitat

Le type d'un habitat exploité par les anguilles est fonction de leur âge et croissance. En ce qui concerne le substrat de fond, le substrat de type bloc est le substrat le plus exploité par les anguilles 5+. L'assemblage de blocs permet en effet un bon enfouissement et une bonne protection contre le courant et les prédateurs. Les racines ont également la propriété de permettre un bon enfouissement des anguilles 5+ et sont en 2ème position parmi le substrat de fond le plus utilisé par les anguilles. Il est important pour des anguilles ayant atteint ce stade 5+, un stade très cryptique, sédentaire et photophobe de trouver des conditions optimales de vie pour une bonne croissance et survie ainsi qu'une bonne économie d'énergie et accumulation des lipides nécessaires lors de leur migration de retour vers la mer des Sargasse à des fins de reproduction.

Au cours de la croissance des anguilles, on observe une utilisation accrue de substrats de type blocs. Les anguilles les plus jeunes (2+) ont besoin de substrat de fond à granulométrie plus fine pour leur enfouissement tandis qu'en grandissant, notamment en 2022 (anguilles 5+), elles préfèrent des substrats plus grossiers capables de bien dissimuler leur corps plus grand et épais (Laffaille et al., 2003). L'exploitation des habitats plus profonds dans des cours d'eau est de plus en plus élevée avec l'âge des anguilles et serait également liée au besoin de plus en plus élevé de dissimulation de la morphologie croissant avec l'âge (Colson, 2018;

Dupuy, 2021). La profondeur moyenne exploitée par les anguilles à l'âge 1+ est de **17** cm tandis qu'elle est de **42** cm à l'âge 5+. Parmi les faciès d'écoulement, c'est le plat courant qui est le plus utilisé par les anguilles à tout âge, avec **75** % d'exploitation par les anguilles 5+. La couverture végétale est également la plus utilisée par les anguilles à tout âge (Ali Abdou, 2019; Amoussou, 2020; Colson, 2018; Dupuy, 2021), cela peut être lié au fait qu'au bord de la rivière la végétation soit prédominante, mais peut être également dû au caractère photophore de l'anguille au stade 5+. En post crues, le micro-habitat (c'est-à-dire l'habitat lié directement à l'anguille) idéal peut être défini pour les anguilles 5+ comme étant un milieu plus profond que celui des stades précédant, avec substrat de fond de type bloc dominant alimenté en faciès d'écoulement de type plat courant et recouvert par une couverture végétale. D'un point de vue de macro-habitat, le milieu idéal serait celui qui est associé à l'abondance numérique et l'abondance relative (taux de détection) maximales. Il serait pour les anguilles 5+, la rivière Berwinne dont les caractéristiques physicochimiques, hydromorphologiques et eutrophiques définissent au mieux le type de macro-habitat/rivière à privilégier lors de la sélection des cours d'eau à repeupler en civelles.

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude, faisant suite à des précédentes recherches sur des anguilles déversées en Wallonie en 2017, menées par l'UGERAA, apporte un complément d'information essentiel au bon déroulement de la pratique de repeuplement en civelles. Nous avons démontré la souplesse/plasticité écologique de l'anguille et la grande capacité de résilience de l'espèce après des épisodes de destruction de l'habitat (crues, engins de chantier). Nous avons également identifié la mobilité élevée, la variabilité comportementale et le macro- et micro-habitat idéal de stade avancé de l'espèce, « les anguilles 5+ ». Ces acquis scientifiques ont été possibles grâce à l'utilisation de la télémétrie RFID mobile basée sur la détection des individus marqués sur de longs parcours de rivières. Les conditions favorables aux anguilles 5+ sont des milieux profonds eutrophes avec eau au pH alcalin, substrat de fond de type bloc, et faciès d'écoulement de type plat courant recouvert par une couverture végétale.

Afin de consolider la conservation de l'anguille européenne, dans tous ses stades de développement dans une même rivière, il est important de protéger la diversité d'habitats pour permettre la résidence et l'installation des anguilles de tout âge. La restauration des macro-habitats/rivières altérés devrait également être entreprise de manière la plus respectueuse de l'environnement et de sa biodiversité et elle ne devrait pas se limiter à la seule restauration /consolidation des berges dévastées. Une attention devrait être accordée à l'enrichissement des rivières en substrats de type blocs perdus après les crues et travaux au regard de son utilisation toujours accrue par les anguilles même après appauvrissement des rivières en blocs. L'amélioration du niveau trophique des rivières permettrait également d'augmenter la rétention et l'installation des anguilles dans les rivières. De plus, cette étude a permis de mettre en évidence les conséquences des crues de juillet 2021 en Wallonie et des travaux d'aménagement qui ont suivi. La poursuite de l'étude par des suivis télémétriques utilisant à la fois le système d'antennes fixes, le système d'antennes mobiles de détection ainsi qu'un suivi complémentaire par radio télémétrie serait recommandée pour mieux comprendre la biologie, l'écologie et la phénologie de déplacements/mouvements/migration de toutes les phases continentales de l'espèce afin de bien gérer la pratique de repeuplement en Wallonie. Cette pratique, utilisée à bon escient permettrait d'améliorer le stock local d'anguilles européennes et à long terme d'atteindre le taux d'échappement des anguilles argentées recommandé par le plan européen de sauvegarde de l'anguille européenne.

Bibliographie:

- Aarestrup, K., Økland, F., Hansen, M. M., Righton, D., Gargan, P., Castonguay, M., Bernatchez, L., Howey, P., Sparholt, H., Pedersen, M. I., & McKinley, R. S. (2009). Oceanic Spawning Migration of the European Eel (*Anguilla anguilla*). *Science*, 325(5948), 1660-1660.
- Ali Abdou, O. (2019). *Suivi par télémétrie de l'occupation du temps et de l'espace de jeunes stades d'anguilles européennes issues d'un repeuplement.*
- Amoussou, G. B. (2020). *L'Anguille européenne (Anguilla anguilla L., 1758) dans une diversité typologique des cours d'eau du bassin hydrographique de la Meuse belge : Mobilité et habitats optimaux post-repeuplement.*
- Baras, E., Philippart, J.-C., & Salmon, B. (1996). *Estimation of migrant yellow eel stock in large rivers through the survey of fish passes : A preliminary investigation in the River Meuse (Belgium).*
- Baudoin, J.-M., Burgun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., Steinbach, P., & Voegtle, B. (2015). *Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application.* 200.
- Belpaire, C., Goemans, G., Geeraerts, C., Quataert, P., Parmentier, K., Hagel, P., & De Boer, J. (2009). Decreasing eel stocks : Survival of the fattest? *Ecology of Freshwater Fish*, 18(2), 197-214.
- Chang, Y.-L. K., Feunteun, E., Miyazawa, Y., & Tsukamoto, K. (2020). New clues on the Atlantic eels spawning behavior and area : The Mid-Atlantic Ridge hypothesis. *Scientific Reports*, 10(1), 15981.
- Colson, D. (2018). *Caractérisation des habitats optimaux pour le repeuplement de civelles d'anguille européenne dans le bassin hydrographique de la Meuse.*
- Cresci, A. (2020). A comprehensive hypothesis on the migration of European glass eels (*Anguilla anguilla*). *Biological Reviews*, 95(5), 1273-1286.
- Crivelli, A. J., Auphan, N., Chauvelon, P., Sandoz, A., Menella, J.-Y., & Poizat, G. (2008). Glass eel recruitment, *Anguilla anguilla* (L.), in a Mediterranean lagoon assessed by a glass eel trap :

- Factors explaining the catches. In *Fish and Diadromy in Europe (ecology, management, conservation)* (p. 79-86). Springer.
- Daverat, F., Limburg, K., Thibault, I., Shiao, J., Dodson, J., Caron, F., Tzeng, W., Iizuka, Y., & Wickström, H. (2006). Phenotypic plasticity of habitat use by three temperate eel species, *Anguilla anguilla*, *A. japonica* and *A. rostrata*. *Marine Ecology Progress Series*, 308, 231-241.
- Daverat, F., Tomas, J., Lahaye, M., Palmer, M., & Elie, P. (2005). Tracking continental habitat shifts of eels using otolith Sr/Ca ratios : Validation and application to the coastal, estuarine and riverine eels of the Gironde - Garonne - Dordogne watershed. *Marine and Freshwater Research*, 56(5), 619.
- Dekker, W. (2003). Status of the European Eel Stock and Fisheries. In K. Aida, K. Tsukamoto, & K. Yamauchi (Éds.), *Eel Biology* (p. 237-254). Springer Japan.
- Dupuy, G. (2021). *Densité, habitat et comportement postrepeuplement chez l'anguille européenne (Anguilla anguilla L., 1758) dans le bassin hydrographique de la Meuse belge.*
- Edeline, E., Lambert, P., Rigaud, C., & Elie, P. (2006). Effects of body condition and water temperature on *Anguilla anguilla* glass eel migratory behavior. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 331(2), 217-225.
- Feunteun, E. (2002). Management and restoration of European eel population (*Anguilla anguilla*) : An impossible bargain. *Ecological Engineering*, 18(5), 575-591.
- Feunteun, E., & Marion, L. (1994). Assessment of Grey Heron predation on fish communities : The case of the largest European colony. *Hydrobiologia*, 279(1), 327-344.
- Friedland, K. D., Miller, M. J., & Knights, B. (2007). Oceanic changes in the Sargasso Sea and declines in recruitment of the European eel. *ICES Journal of Marine Science*, 64(3), 519-530.
- Ibbotson, A., Smith, J., Scarlett, P., & Aprhamian, M. (2002). Colonisation of freshwater habitats by the European eel *Anguilla anguilla* : Colonisation of freshwater habitats by eels. *Freshwater Biology*, 47(9), 1696-1706.

- ICES. (2020). *European eel (Anguilla anguilla) throughout its natural range (ICES Advice 2020)* [Report of the ICES Advisory Committee]. ICES.
- LaBar, G. W., Hernando Casal, J. A., & Delgado, C. F. (1987). Local movements and population size of European eels, *Anguilla anguilla*, in a small lake in southwestern Spain. *Environmental Biology of Fishes*, 19(2), 111-117.
- Laffaille, P., Feunteun, E., Baisez, A., Robinet, T., Acou, A., Legault, A., & Lek, S. (2003). Spatial organisation of European eel (*Anguilla anguilla* L.) in a small catchment. *Ecology of Freshwater Fish*, 12(4), 254-264.
- Lefebvre, F., Fazio, G., Mounaix, B., & Crivelli, A. J. (2013). Is the continental life of the European eel *Anguilla anguilla* affected by the parasitic invader *Anguillicoloides crassus*? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1754).
- Legault, A. (1988). Le franchissement des barrages par l'escalade de l'anguille. Etude en Sèvre Niortaise. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 308, 1-10.
- Libois, R., & Rosoux, R. (1989). Ecologie de la loutre (*Lutra lutra*) dans le Marais Poitevin 1. Etude de la consommation d'anguilles. *Vie et milieu*, 39(3-4), 191-197.
- Maes, G. E., Raeymaekers, J. A. M., Pampoulie, C., Seynaeve, A., Goemans, G., Belpaire, C., & Volckaert, F. A. M. (2005). The catadromous European eel *Anguilla anguilla* (L.) as a model for freshwater evolutionary ecotoxicology : Relationship between heavy metal bioaccumulation, condition and genetic variability. *Aquatic Toxicology*, 73(1), 99-114.
- Malavoi, J. R., & Souchon, Y. (2002). Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : Clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 365-366, 357-372.
- Marchelidon, J., Le Belle, N., Hardy, A., Vidal, B., Sbaihi, M., Burzawa-Gérard, E., Schmitz, M., & Dufour, S. (1999). Etude 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.
- Michel, P. (1995). Feeding habits of fourteen European freshwater fish species. *Cybiurn*, 19, 5-46.
- Moriarty, C., & Dekker, W. (1997). *Management of the European Eel*. 59.
- Naisbett-Jones, L. C., Putman, N. F., Stephenson, J. F., Ladak, S., & Young, K. A. (2017). A Magnetic Map Leads Juvenile European Eels to the Gulf Stream. *Current Biology*, 27(8), 1236-1240.
- Naismith, I. A., & Knights, B. (1988). Migrations of elvers and juvenile European eels, *Anguilla anguilla* L., in the River Thames. *Journal of Fish Biology*, 33(sa), 161-175.
- Nzau Matondo, B., Benitez, J. P., Dierckx, A., Philippart, J. C., & Ovidio, M. (2017). Assessment of the Entering Stock, Migration Dynamics and Fish Pass Fidelity of European Eel in the Belgian Meuse River : Migration Dynamics of Yellow Eels. *River Research and Applications*, 33(2), 292-301.
- Nzau Matondo, B., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Renardy, S., Rollin, X., Colson, D., Baltus, L., Romain, V. R. M., & Ovidio, M. (2021). What are the best upland river characteristics for glass eel restocking practice? *Science of the Total Environment*, 784, 147042.
- Nzau Matondo, B., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Rollin, X., & Ovidio, M. (2020). An Evaluation of Restocking Practice and Demographic Stock Assessment Methods for Cryptic Juvenile European Eel in Upland Rivers. *Sustainability*, 12(3), 1124.
- Nzau Matondo, B., Delrez, N., Bardonnnet, A., Vanderplasschen, A., Joaquim-Justo, C., Rives, J., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Séleck, E., Rollin, X., & Ovidio, M. (2022). A complete check-up of European eel after eight years of restocking in an upland river : Trends in growth, lipid content, sex ratio and health status. *Science of The Total Environment*, 807, 151020.
- Nzau Matondo, B., & Ovidio, M. (2016). Dynamics of upstream movements of the European eel *Anguilla anguilla* in an inland area of the River Meuse over the last 20 years. *Environmental Biology of Fishes*, 99(2-3), 223-235.

- Nzau Matondo, B., & Ovidio, M. (2018). Decreased stock entering the Belgian Meuse is associated with the loss of colonisation behaviour in yellow-phase European eels. *Aquatic Living Resources*, 31, 7.
- Nzau Matondo, B., & Ovidio, M. (2021). Bilan de quatre années de suivi de l'anguille européenne, repeuplée dans une diversité typologique des cours d'eau du bassin hydrographique de la Meuse belge en Wallonie. *Info Vesdre*, 94, 12-13.
- Nzau Matondo, B., Philippart, J.-C., Dierckx, A., Benitez, J.-P., Rimbaud, G., & Ovidio, M. (2015). *Estimation de l'abondance du stock des anguilles recrutées par migration de remontée dans la Meuse en Wallonie et réalisation des essais de repeuplement en juvéniles. Rapport final du projet financé par le Fonds européen pour la Pêche (Code projet : 32-1102-002)*. ULg-Université de Liège.
- Nzau Matondo, B., Séleck, E., Dierckx, A., Benitez, J., Rollin, X., & Ovidio, M. (2019). What happens to glass eels after restocking in upland rivers? A long-term study on their dispersal and behavioural traits. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 29(3), 374-388.
- Oehm, J., Thalinger, B., Eisenkölbl, S., & Traugott, M. (2017). Diet analysis in piscivorous birds : What can the addition of molecular tools offer? *Ecology and Evolution*, 7(6), 1984-1995.
- Ovidio, M., Baras, E., Goffaux, D., Giroux, F., & Philippart, J. C. (2002). *Seasonal variations of activity pattern of brown trout (Salmo trutta) in a small stream, as determined by radio-telemetry*. 8.
- Ovidio, M., L Serebinski, A., Philippart, J.-C., & Nzau Matondo, B. (2013). A bit of quiet between the migrations : The resting life of the European eel during their freshwater growth phase in a small stream. *Aquatic Ecology*, 47(3), 291-301.
- Ovidio, M., Tarrago-Bès, F., & Matondo, B. N. (2015). Short-term responses of glass eels transported from UK to small Belgian streams. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 51(3), 219-226.

- 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? *Naturwissenschaften*, *93*(3), 145-148.
- Pankhurst, N. W. (1982a). Changes in the skin-scale complex with sexual maturation in the European eel, *Anguilla anguilla* (L.). *Journal of Fish Biology*, *21*(5), 549-561.
- Pankhurst, N. W. (1982b). Relation of visual changes to the onset of sexual maturation in the European eel *Anguilla anguilla* (L.). *Journal of Fish Biology*, *21*(2), 127-140.
- Pankhurst, N. W., & Lythgoe, J. N. (1982). Structure and colour of the integument of the European eel *Anguilla anguilla* (L.). *Journal of Fish Biology*, *21*(3), 279-296.
- Pedersen, M. I., & Rasmussen, G. H. (2016). Yield per recruit from stocking two different sizes of eel (*Anguilla anguilla*) in the brackish Roskilde Fjord. *ICES Journal of Marine Science*, *73*(1), 158-164.
- Philippart, J.-C. (2007). *L'avenir démographique de l'anguille européenne (Anguilla anguilla) dans la Meuse. Déclin inexorable ou sauvetage in extremis?*
- Philippart, J.-C., Ovidio, M., Rimbaud, G., Dierckx, A., & Poncin, P. (2010). *Bilan des observations sur les populations de l'anguille dans les sous-bassins hydrographiques Meuse aval, Ourthe, Amblève et Vesdre comme bases biologiques à la prise de mesures de gestion en rapport avec le Règlement Anguille 2007 de l'Union européenne.*
- Pike, C., Crook, V., & Gollock, M. (2018). *Anguilla anguilla, European eel* (e. T60344A152845178.; The IUCN Red List of Threatened Species). International Union for Conservation of Nature.
- Rigaud, C., Beaulaton, L., Briand, C., Charrier, F., Feunteun, E., Mazel, V., Pozet, F., Prévost, E., Tréguier, A., & Verreault, G. (2015). *Le programme français de repeuplement en civelles : Bilan des trois premières années de transferts.* irstea.
- Simonneaux, V., Barra, J. A., Humbert, W., & Kirsch, R. (1987). The role of mucus in ion absorption by the oesophagus of the sea-water eel (*Anguilla anguilla* L.) : Electrophysiological, structural and cytochemical investigations. *Journal of Comparative Physiology B*, *157*(2), 187-199.

- Steendam, C., Verhelst, P., Van Wassenbergh, S., & De Meyer, J. (2020). Burrowing behaviour of the European eel (*ANGUILLA ANGUILLA*): Effects of life stage. *Journal of Fish Biology*, 97(5), 1332-1342.
- Tesch, F. W., & Thorpe, J. E. (Éds.). (2003). *The Eel* (1^{re} éd.). Wiley.
- Van Ginneken, V., Palstra, A., Leonards, P., Nieveen, M., van den Berg, H., Flik, G., Spanings, T., Niemantsverdriet, P., van den Thillart, G., & Murk, A. (2009). PCBs and the energy cost of migration in the European eel (*Anguilla anguilla* L.). *Aquatic Toxicology*, 92(4), 213-220.
- Violi, L., Falcone, G., De Luca, A. I., & Chies, L. (2015). Sustainability European Eel Population : A Statistical Survey on Production, Conservation Status and Market Trends. *Calitatea*, 16(148), 83.
- 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(3), 15.
- Watanabe, S., Miller, M. J., Aoyama, J., & Tsukamoto, K. (2009). Morphological and meristic evaluation of the population structure of *Anguilla marmorata* across its range. *Journal of Fish Biology*, 74(9), 2069-2093.
- White, E. M., & Knights, B. (1997). Dynamics of upstream migration of the European eel, *Anguilla anguilla* (L.), in the Rivers Severn and Avon, England, with special reference to the effects of man-made barriers. *Fisheries Management and Ecology*, 4(4), 311-324.
- Wood, P., Partridge, J. C., & Grip, W. J. (1992). Rod visual pigment changes in the elver of the eel *Anguilla anguilla* L. measured by microspectrophotometry. *Journal of Fish Biology*, 41(4), 601-611.

ANNEXE

| Rivière/Secteur | Date de détection | Linéaire scanné (m) | Nombre d'anguille détecté |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| Berwinne/10- Boukai Moulin | 11/04/2022 | 520 | 21 |
| Berwinne/ 2-Val Dieu | 19/04/2022 | 400 | 51 |
| | 20/04/2022 | 600 | 19 |
| | 21/04/2022 | 600 | 6 |
| Gueule/ 1-Plombière | 22/04/2022 | 450 | 4 |
| Gueule/2- Plombière | 22/04/2022 | | 12 |
| Wayai/ 8-Spa | 29/04/2022 | 800 | 14 |
| Wayai/ 9-Spa | 29/04/2022 | | 11 |
| Wayai/Spixhe 3, 2, et aval | 11/05/2022 | 1089 | 1 |
| Oxhe/Ox 1, 2, et aval | 26/04/2022 | 800 | 15 |
| Hoëgne/3, 2, 1, et aval | 12/05/2022 | 1480 | 6 |
| Winamplanche/ Win 1 et amont | 10/05/2022 | 900 | 11 |

Tableau 4 : Synthèse des résultats des sessions télémétriques mobiles basées sur la détection des anguilles 5+ par secteur.

| | Berwinne | Gueule | Wayai | Hoëgne | Winamplanche | Oxhe |
|-------------|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|
| 2018 | 15/05/2018 | 14/06/2018 | 25/05/2018 | 25/05/2018 | - | 19/04/2018 |
| 2019 | 14/05/2019 | 16/05/2019 | 17/05/2019 | 22/05/2019 | 17/0/2019 | 25/04/2019 |
| | 23/05/2019 | 23/05/2019 | 21/05/2019 | | | 10/05/2019 |
| 2020 | 08/05/2020 | - | 27/01/2020 | 29/04/2020 | 22/04/2020 | 21/04/2020 |
| | 13/05/2020 | | 23/04/2020 | 06/05/2020 | | 22/04/2020 |
| | 14/05/2020 | | 07/05/2020 | 15/06/2020 | | |
| | 15/05/2020 | | | 22/06/2020 | | |
| | | | 26/06/2020 | | | |
| 2021 | 13/05/2021 | 17/05/2021 | 29/04/2021 | 10/05/2021 | 30/04/2021 | 03/05/2021 |
| | 04/05/2021 | | 30/04/2021 | | | |

Tableau 5 : Dates des sessions télémétriques par rivière étudiée

| | Berwinne | Gueule | Wayai | Hoëgne | Winamplanche | Oxhe |
|-------------|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|
| 2017 | 06/09/2017 | 28/09/2017 | 04/10/2017 | 13/10/2017 | 03/10/2017 | 25/10/2017 |
| | 08/09/2017 | | 11/10/2017 | 17/10/2017 | | |
| 2018 | 16/05/2018 | 18/09/2018 | 03/10/2018 | 09/10/2018 | 05/09/2018 | 16/10/2018 |
| | 25/09/2018 | 19/09/2018 | 04/10/2018 | 10/10/2018 | | |
| | 26/09/2018 | | | | | |
| 2019 | 15/05/2019 | 17/09/2019 | 26/09/2019 | 15/10/2019 | 23/10/2019 | 29/08/2019 |
| | 24/09/2019 | 18/09/2019 | 01/10/2019 | | | |
| | 10/10/2019 | | | | | |
| 2020 | 23/09/2020 | 08/09/2020 | 29/09/2020 | 25/09/2020 | 15/09/2020 | 17/09/2020 |
| | 30/09/2020 | 11/09/2020 | 06/10/2020 | 07/10/2020 | | |
| 2021 | 17/09/2021 | 13/10/2021 | 22/10/2021 | 15/10/2021 | 20/10/2021 | 27/10/2021 |

Tableau 6 : Dates des sessions de pêches par rivière étudiée