



---

*Avec le soutien du Fonds européen pour la pêche, « investissons dans une pêche durable ».*

Projet financé par le Fonds européen pour la Pêche et Service Public de Wallonie,  
Département de la Nature et des Forêts

*Code projet: 32-1102-002*

## **RAPPORT FINAL**

# **ESTIMATION DE L'ABONDANCE DU STOCK DES ANGUILLES RECRUTEES PAR MIGRATION DE REMONTEE DANS LA MEUSE EN WALLONIE ET REALISATION DES ESSAIS DE REPEUPLEMENT EN JUVENILES**

**Billy NZAU MATONDO,  
Jean-Claude PHILIPPART, Arnaud DIERCKX, Jean-Philippe BENITEZ, Gilles RIMBAUD  
& Michaël OVIDIO**

Université de Liège – Faculté des Sciences  
Unité de Biologie du Comportement  
Centre de recherche en Ichtyologie Fondamentale et Appliquée (AFFISH-RC)  
Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie (LDPH)  
22 quai E. Van Beneden, 4020 Liège



## TABLE DES MATIERES

---

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>ACTION 1. PREPARATION DES ACTIONS DE TERRAIN, BIBLIOGRAPHIE ET SYNTHESE DES DONNEES HISTORIQUES</b>	<b>4</b>
<b>ACTION 2. PIEGEAGE DANS LES ECHELLES A POISSONS, MARQUAGE ET SUIVI DES MIGRATIONS, SUIVI DES REPEUPEMENTS</b>	
2.1. ESTIMATION DU STOCK EN AVAL ET UTILISATION DES ECHELLES A POISSONS DE LIXHE	20
2.2. SUIVI DES MIGRATIONS DANS LES AXES FLUVIAUX MEUSE ET OURTHE	59
2.3. ESSAIS DE REPEUPEMENTS EN CIVELLES IMPORTEES	93
<b>ACTION 3 : DENOMBREMENT DES POPULATIONS EN RIVIERES</b>	<b>126</b>
<b>ACTION 4 : TRAITEMENTS DE DONNEES ANNUELLES, ANALYSE DES RESULTATS ET REDACTION D'ARTICLES SCIENTIFIQUES</b>	<b>127</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS</b>	<b>130</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>133</b>

---

Citation recommandée du rapport :

**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*) et Service Public de Wallonie, Département de la Nature et des Forêts. Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie de l'Université de Liège, 136 pages.

## INTRODUCTION GENERALE

---

Ce rapport final présente les résultats des recherches menées par le Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie (LDPH) de l'Unité de Biologie du comportement dans le cadre d'un projet co-financé par le Fonds Européen pour la Pêche (FEP) et le Service Public de Wallonie, Département de la Nature et des Forêts (code projet : 32-1102-002) intitulé «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. »

L'anguille européenne *Anguilla anguilla* est une espèce migratrice historiquement présente sur le bassin hydrographique de la Meuse belge. Comme dans toute son aire de répartition, l'état de stock de l'anguille sur le bassin de la Meuse belge est actuellement dans une situation alarmante qui nécessite, en accord avec le Règlement Anguille 2007 de l'Union européenne (UE 2007) et le Plan Anguille Belgium (Vlietinck et al. 2008), la mise en place des actions et mesures d'urgence de restauration et sauvegarde de l'espèce. Une telle démarche exige au préalable une bonne connaissance de la dynamique des recrutements fluviaux et de l'efficacité d'un soutien aux populations locales des anguilles par des pratiques de repeuplement en juvéniles. Par sa position géographique, la province de Liège de la Région Wallonne en Belgique abrite des milieux aquatiques stratégiques d'entrée et de sortie du bassin de la Meuse belge pour les anguilles migratrices en remontée et en dévalaison depuis et vers le milieu marin, via la Meuse néerlandaise (Philippart et al. 2010). Ces milieux aquatiques apparaissent comme de très intéressants sites écologiques pour récolter de précieuses informations sur la biologie de l'anguille, utiles à une amélioration de la politique de gestion de l'espèce.

Les principaux objectifs de cette étude sont :

- Estimer l'abondance du stock de jeunes anguilles entrant en Wallonie à partir de la Mer du Nord via la Meuse néerlandaise ;
- Réaliser des essais de repeuplements avec des civelles importées ;
- Etudier les voies et patrons de migrations d'anguilles jaunes dans l'axe Meuse-Ourthe ;
- Traiter les données historiques accumulées au LDPH depuis plus de 20 ans sur certains aspects de l'écologie des anguilles.

Pour atteindre ces objectifs, 5 actions ont été prévues dans le programme de recherche initial :

Action 1 : « **Préparation des actions de terrain, bibliographie et synthèse des données historiques** ». Cette action consiste à préparer des actions de terrain sur la base d'une connaissance scientifique très fouillée de la biologie de l'anguille, à actualiser régulièrement cette connaissance et à traiter les données historiques récoltées sur l'anguille au LDPH depuis 1992.

Action 2 : « **Piégeage dans les échelles à poissons, marquage et suivi des migrations, suivis des repeuplements** ». Cette action est la poursuite du contrôle du piège de capture des anguilles en montaison dans les échelles à poissons du barrage de Lixhe ; l'étude du flux migratoire des anguilles en Meuse belge à partir de la Mer du Nord via la Meuse néerlandaise ; la poursuite de l'étude des voies et patrons de migrations d'anguilles jaunes dans l'axe Meuse-Ourthe et ; la réalisation des essais de repeuplements en civelles importées.

Action 3 : « **Dénombrement des populations en rivières** ». Cette action réside en un suivi par pêche électrique de jeunes anguilles recrutées dans les rivières cibles après le repeuplement expérimental en civelles importées.

Action 4 : « **Traitements des données annuelles, analyse des résultats et rédactions d'articles scientifiques** ». Cette action intègre le traitement des données annuelles et leur large diffusion sous formes d'articles scientifiques et de participation à des conférences internationales.

Action 5 : « **Rapport final et préparations des actions futures.** ». Cette action comprend la rédaction du rapport final de l'étude, avec propositions des actions envisageables dans le futur.

Le travail scientifique a principalement été mené par le Dr Billy Nzau Matondo, Ingénieur de recherche sous la supervision scientifique du Dr Michaël Ovidio, Expert Scientifique à l'Université de Liège et directeur du LDPH. Nous remercions le Dr Jean-Claude Philippart, chercheur qualifié FNRS honoraire pour son soutien scientifique et pour la mise à disposition de données historiques de remontée des anguilles à Lixhe. Cette étude a nécessité de nombreuses heures de travail sur le terrain, de mises au point techniques et nous tenons à remercier les autres membres de l'équipe pour leur efficacité et leur motivation : Arnaud Dierckx, gradué en agronomie, Jean-Philippe Benitez, licencié en Biologie doctorant et Gilles Rimbaud, ingénieur industriel. Merci à Frédérique Tarrago-Bes de l'Université de Bordeaux qui a réalisé son mémoire de fin d'étude de Master 2 en lien avec ce projet. Un merci particulier est adressé à notre Secrétaire Exécutive, Françoise Bruls pour son appui administratif très apprécié dans le suivi des projets FEP. Merci au Professeur Pascal Poncin pour son accueil au sein de son service de Biologie du Comportement lors du déménagement du LDPH de Tihange vers Liège en 2014 et pour les facilités logistiques mises à notre disposition.

Nous tenons également à remercier tous les organismes et toutes les personnes qui ont participé financièrement, scientifiquement et techniquement à la réalisation des études décrites dans ce rapport. Nous remercions spécialement Monsieur le Ministre Carlo Di Antonio (Ministère des Travaux publics, de l'Agriculture, de la Ruralité, de la Nature, de la

Forêt et du Patrimoine de la Région Wallonne lors de la soumission du projet) qui a participé au co-financement avec l'UE de cette recherche à l'ULg. Nous n'oublions pas le Service de la Pêche (DNF) : représenté par Michel Villers et Xavier Rollin pour la confiance qu'ils nous témoignent en nous accordant ce financement ainsi que François Fontaine et Marie Astrid Jamar de Bolsée pour le suivi administratif du projet au SPW. Nous remercions aussi particulièrement les membres du comité d'accompagnement, non encore cités, pour leur participation active aux débats très instructifs au cours des réunions : Patrice Orban (DCENN), Alain Gillet (DGO2) et Olivier Detrait (DCENN). Les pêches électriques d'inventaires ont été réalisées avec l'aimable collaboration des personnes du contrat de rivière Meuse Aval, de Arnaud Van den Hove de la Fédération Halieutique Vesdre ainsi que des étudiants de l'Ulg. Nous remercions toutes ces personnes pour l'intérêt accordé à cette étude.

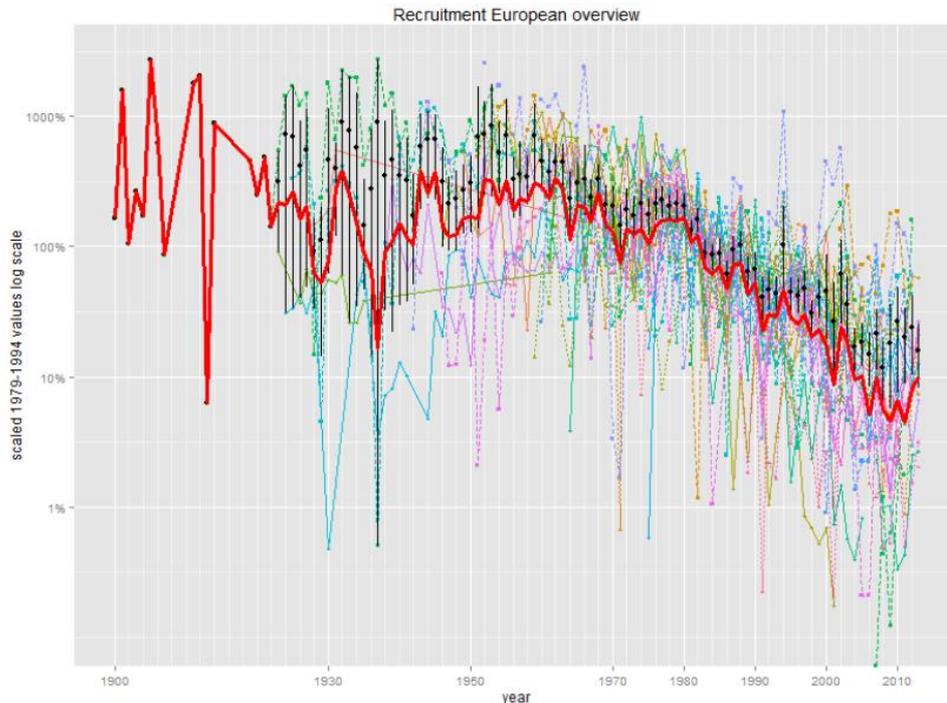
**ACTION 1. PREPARATION DES ACTIONS DE TERRAIN, BIBLIOGRAPHIE ET SYNTHESE DES  
DONNEES HISTORIQUES**

## 1.1. Introduction

La phase de colonisation de l'anguille européenne *Anguilla anguilla* est une période clé dans le cycle de vie de l'espèce. En effet, au cours de cette phase, l'anguille réalise des déplacements sur des distances importantes entre son lieu unique de reproduction et ses habitats de croissance, lesquels peuvent être très diversifiés (zones côtières, estuaires, fleuves, ruisseaux, marais, étangs) (Bardonnnet et al. 2005 ; van Ginneken & Maes 2005). Le succès et l'intensité de colonisation de ces types d'habitats de prédilection pour la croissance de l'anguille influencent la contribution potentielle de ces milieux continentaux au stock des futurs géniteurs chez cette espèce panmictique.

De par son cycle biologique très original, l'anguille présente encore aujourd'hui de nombreuses inconnues sur certains aspects de sa biologie. En effet, l'anguille se particularise par un cycle de vie long et complexe, de nombreuses métamorphoses au cours de la vie, une nage par reptation, une population homogène dans toute l'Europe, une unique reproduction au cours de la vie et un seul lieu de reproduction dans les profondeurs de la mer des Sargasses (Hanski 1998 ; Tesch 2003 ; van Ginneken & Maes 2005). Toutes ces particularités biologiques réunies font de l'anguille une espèce très vulnérable à l'extinction mais aussi une espèce très compliquée à gérer durablement de manière coordonnée (Baisez & Laffaille 2005 ; Als et al. 2011).

D'ailleurs, c'est depuis les années 1940 dans les pays baltes que les scientifiques évoquent le déclin de l'anguille (Svårdson 1976 ; Wickström 1986). Plus tard, au début des années 1980, le déclin de l'abondance continentale de l'anguille sera mentionnée sur tous les stades de vie de l'espèce (larves leptocéphales, civelles, anguilles jaunes, anguilles argentées) à travers toute son aire de répartition (Moriarty & Dekker 1997 ; Dekker 2003). Le stock serait aujourd'hui autour de 5% du niveau des années 1960-1970 comme illustré sur la figure ci-dessous qui résume la tendance européenne des recrutements en civelles et anguilles jaunes dans 45 rivières (ICES 2013).



**Fig. 1.** Tendence moyenne (en rouge) des recrutements en civelles et anguilles jaunes jusqu'en 2013 dans 45 rivières européennes (source : ICES 2013).

Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer le déclin de l'anguille. Parmi ces hypothèses, il y a les changements climatiques, les pollutions, les pertes d'habitats, le parasitisme, les barrages, la surpêche (Baisez & Laffaille 2005 ; ICES 2013). Certains auteurs affirment même que ces facteurs de régression démographique de l'anguille agissent en association.

De nombreuses études ont révélé l'état de grave régression démographique des stocks européens de l'espèce et les causes probables de son déclin. En revanche, les changements qui sont intervenus dans les populations d'anguilles en montaison (phase de colonisation des eaux douces) ont été peu étudiés. Désaunay & Guérault (1997) observent une réduction des tailles des civelles en conditions des pressions environnementales défavorables et des baisses démographiques de l'anguille. Robinet et al. (2007) et MacNamara & McCarthy (2014) évoquent l'absence d'échappement vers la mer des anguilles matures (anguilles argentées), dans des populations en déclin, pendant les années où les conditions hydrologiques locales comme les hivers secs sont défavorables à l'émigration. Dans ces conditions, une minorité de ces anguilles argentées peut régresser au stade d'anguilles jaunes (Feunteun et al. 2000). D'après Ibbotson et al. (2002), le milieu estuarien et les parties aval des fleuves seraient des zones à structure par sexe biaisé en faveur des anguilles mâles qui vivent moins longtemps avant l'échappement vers le site de reproduction. Sur le stade de développement « anguille jaune », la méconnaissance des changements biologiques associés à la grave régression démographique de l'espèce, s'accroît davantage avec l'éloignement géographique par rapport à la mer. Pourtant, une telle connaissance serait particulièrement intéressante et essentielle pour un bassin hydrographique comme la Meuse, dans la compréhension des changements biologiques

intervenues dans la population et la prédiction de la contribution locale aux futurs stocks des géniteurs panmictiques.

La présente étude est réalisée sur des données de remontée des anguilles dans le piège de l'ancienne échelle à poissons de Lixhe contrôlé en suivant une même méthodologie sur une période de temps assez longue allant de 1992 à 2014. L'ancienne échelle est implantée sur le site du barrage de Lixhe sur la Meuse belge à 323 km en amont de la mer du Nord. En fin 1998, la nouvelle échelle à poissons est mise en fonction comme une deuxième route de migration de remontée sur le site du Lixhe mais elle présente la particularité d'être équipée d'une nasse qui ne retient pas les anguilles qui y transitent. Notre étude a pour objectifs :

- Évaluer l'évolution temporaire du nombre d'anguilles capturées au cours de leur migration de remontée dans l'ancienne échelle depuis 1992.
- Identifier les changements intervenus dans la période de migration des anguilles en remontée dans l'ancienne échelle depuis 1992.
- Examiner le rôle de la température de l'eau sur la remontée des anguilles capturées dans l'ancienne échelle depuis 1992.
- Étudier les changements intervenus dans la taille corporelle des anguilles en remontée dans l'ancienne échelle depuis 1992.

## 1.2. Matériel et méthodes

### 1.2.1. Site d'étude

L'étude a été réalisée sur les données des anguilles capturées au cours des saisons de migration 1992 – 2014. Les captures des anguilles ont eu lieu dans l'ancienne échelle à poissons du barrage de Lixhe à Visé, dans la province de Liège, au sein de la région Wallonne en Belgique (Fig.2).



**Fig. 2.** Carte de localisation générale du site de l'étude (rectangle noir) dans la province de Liège en Belgique.

L'ancienne échelle à poissons de Lixhe est constituée de bassins successifs et bénéficie d'un système de piégeage permettant une capture totale des anguilles qui y transitent. Ses caractéristiques physiques sont largement détaillées dans le chapitre 2.1.

### 1.2.2. Méthodologie d'échantillonnage

De 1992 à 2014, le piège de l'ancienne échelle a été contrôlé deux jours par semaine. Cette fréquence de contrôle est portée à trois jours par semaine dès l'observation du premier pic des captures des anguilles pendant la saison de migration. Les anguilles capturées sont anesthésiées (2-Phénoxy-éthanol : 0.5 mL/L), dénombrées, mesurées ( $\pm 1$  mm) et pesées ( $\pm 1$ g).

Les données annuelles de remontée des anguilles dans l'ancienne échelle depuis 1992 ont été examinées en termes de :

- nombre d'anguilles capturées par an,
- nombre record d'anguilles capturées quotidiennement,
- date de remontée,
- température de l'eau,
- taille des anguilles et leur taux potentiel d'argenture.

La relation entre le poids et la longueur totale des anguilles migrantes a été établie à partir d'un sous-échantillon de 1572 anguilles de 196 – 882 mm, représentatif de la série d'années étudiées. La longueur corporelle de 5%, 50% et 95% d'anguilles dans la distribution des fréquences des tailles ainsi que la longueur minimale des anguilles, la longueur maximale des anguilles et les écarts des longueurs de 90% et 100% d'anguilles capturées, ont été analysés au cours de chaque année de remontée des anguilles.

Le taux potentiel d'argenture des anguilles capturées a été estimé en termes de nombre d'anguilles et de leurs biomasses, par transposition d'un modèle démographique d'anguilles appelé DemCam mis au point pour les populations d'anguilles de la Camargue (De Leo & Gatto 1995). Ce modèle est robuste pour décrire la démographie d'autres populations d'anguilles (MacNamara & McCarthy 2014). Il est basé sur les classes des tailles des anguilles jaunes en remontée auxquelles sont attribuées en fonction des sexes un coefficient de conversion en anguilles argentées (classes des longueurs /coefficient d'argenture : mâles, <31cm / 0 ; 31-37 cm / 0.35 ; 37-43 cm / 0.85 et, femelles, 43-49 cm / 0.4 ; 49-55 cm / 0.6 ; 55-61 cm / 0.8 et >61 cm / 0.9). D'après le modèle DemCam, une anguille de grande taille possède une probabilité plus élevée de s'argenter dans l'année de sa migration de remontée dans l'ancienne échelle de Lixhe qu'une anguille de petite taille.

Les dates des captures d'anguilles ont été notées à chaque contrôle de l'ancienne échelle. Elles ont permis de préciser pour chaque saison de migration, la date de passage de la première anguille et la dernière anguille, la date de passage de 5%, 50% et 95% d'anguilles dans la distribution des fréquences des captures ainsi que l'intervalle de temps de passage de 90% et 100% d'anguilles durant la saison de migration.

Considérant le rôle important de la température de l'eau sur la montaison des anguilles (Moriarty 1986 ; Naismith & Knights 1988 ; Nzau Matondo et al. 2014), chaque capture journalière des anguilles en remontée dans l'ancienne échelle a été caractérisée par

la température du jour. Les données thermiques ont été récoltées par le Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie de l'Université de Liège moyennant l'utilisation des enregistreurs automatiques des températures (loggers Onset<sup>®</sup>) placés sur le site d'échantillonnage. Ces données ont permis de caractériser pour chaque année de remontée des anguilles dans l'ancienne échelle des descripteurs thermiques suivants :

- la température de capture de la première anguille et la dernière anguille,
- la température de capture de 5%, 50% et 95% d'anguilles dans la distribution des fréquences des captures,
- l'écart thermique des captures de 90% et 100% d'anguilles.

Les données thermiques ont également permis d'établir la courbe de distribution des fréquences de capture des anguilles dans l'ancienne échelle de 1992 à 2012 en fonction de la température de l'eau.

A cause de l'ouverture en fin 1998 d'une nouvelle échelle de remontée des anguilles sur le site de Lixhe, les données de montaison des anguilles dans l'ancienne échelle en termes de nombre d'anguilles capturées par an et de nombre record d'anguilles capturées quotidiennement sont étudiées en 2 périodes. La première période englobe les années avant l'entrée en fonction de la nouvelle échelle et va de 1992 à 1998. La deuxième période s'étale de 1999 à 2014 et correspond aux années de fonctionnement de la nouvelle échelle.

Pour mettre en évidence, les changements significatifs intervenus dans la remontée des populations migrantes d'anguilles à Lixhe, les Modèles Linéaires Généraux de Régression (GLM) ont été appliqués entre chaque descripteur de la remontée des anguilles et l'année de remontée. L'abondance des classes particulières d'anguilles pour un seuil thermique précis de température de l'eau a été mise en évidence à l'aide du test de probabilité exact de Fisher.

### **1.3. Résultats**

#### **1.3.1. Evolution temporelle du nombre d'anguilles capturées**

Le bilan des captures des anguilles de 1992 à 2014 (tableaux 1 & 2) révèle que 37 626 anguilles (en biomasse 2.43 t) ont été capturées au total dans l'ancienne échelle à poissons du barrage de Lixhe. Avant l'ouverture de la nouvelle échelle en fin 1998, 16 129 anguilles (0.99 t) ont été capturées dans l'ancienne échelle de 1992 à 1998. Après l'entrée en fonction de la nouvelle échelle, le nombre d'anguilles capturées dans l'ancienne échelle s'élève à 21 497 anguilles (1.44 t) de 1999 à 2014. C'est depuis fin 1998, que les anguilles de Lixhe peuvent remonter dans la Meuse à Lixhe via les 2 échelles à poissons.

Avant l'entrée en fonction de la nouvelle échelle de 1992 à 1998, le nombre d'anguilles en montaison capturées annuellement dans l'ancienne échelle baisse significativement ( $R = -0.96$  ;  $R^2 = 0.93$  ; ddl = 3 ;  $p = 0.037$ ) alors que le nombre record d'anguilles capturées journalièrement ne diminue pas significativement ( $R = -0.92$  ;  $R^2 = 0.84$  ; ddl = 3 ;  $p = 0.084$ ). Après l'ouverture de la nouvelle échelle de 1999 à 2014, la baisse de remontée dans l'ancienne échelle est hautement significativement en terme du nombre d'anguilles capturées par année ( $R = -0.78$  ;  $R^2 = 0.61$  ; ddl = 15 ;  $p = 0.0003$ ) et significative en ce qui concerne le nombre record d'anguilles capturées journalièrement ( $R = -0.59$  ;  $R^2 =$

0.35, ddl = 15 ; p = 0.0165). Ceci permet d'affirmer que le phénomène de baisse de remontée des anguilles à Lixhe date depuis 1992 avant l'ouverture d'une deuxième route de remontée des anguilles. L'impact d'ouverture d'une deuxième voie de montaison qu'est la nouvelle échelle a été évalué via une étude RFID de marquage-détection présenté dans le chapitre 2.1. Le nombre d'anguilles capturées dans l'ancienne échelle en 2014 correspond au niveau 5.5% du niveau de l'année 1999 correspondant à l'année de meilleure capture d'anguilles pendant la période après l'entrée en fonction de la nouvelle échelle à poissons. Au cours de cette même période, la capture journalière record d'anguilles de 2014 se situe au niveau 11.2% du niveau record observé en 1999.

Au cours de la période allant de 2002 à 2014, c'est l'année 2008 qui montre le nombre annuel le plus élevé d'anguilles capturées au cours de leur migration de remontée dans l'ancienne échelle à Lixhe.

### **1.3.2. Période et température de remontée d'anguilles**

La période de capture des anguilles en montaison dans l'ancienne échelle n'a pas significativement changé ( $F = 0.971-3.359$  ; ddl = 20 ;  $R = 0.220-0.388$  ;  $p > 0.05$ ) de 1992 à 2014, en ce qui concerne la date de passage de la première et la dernière anguille et, la date de passage de 5% et 95% d'anguilles dans la distribution des fréquences des captures des anguilles. De même, les temps d'intervalle des passages de 90% et 100% d'anguilles n'ont pas significativement évolué depuis 1992 ( $F = 2.746$  ;  $R = 0.355$  ; ddl = 20 ;  $p > 0.05$ ).

En revanche, la température de déclenchement du processus de migration de remontée des anguilles dans l'ancienne échelle a augmenté significativement ( $F = 6.387$  ;  $R = 0.502$  ; ddl = 20 ;  $p = 0.0205$ ) au cours des années, à raison de 1.03°C par décennie. L'écart thermique de passage de 100% d'anguilles dans la distribution des fréquences des captures des anguilles quant à elle, s'est significativement réduit ( $F = 5.932$  ;  $R = -0.488$  ; ddl = 20 ;  $p = 0.0249$ ) à raison de 1.57°C par décennie. Aucun changement significatif n'a été observé chez les anguilles ( $F = 0.128-1.918$  ;  $R = 0.082-0.303$  ; ddl = 20 ;  $p = 0.182-0.724$ ) en ce qui concerne la température de capture de la dernière anguille, la température de capture de 5%, 50% et 95% d'anguilles dans la distribution des captures et l'écart thermique des captures de 90% d'anguilles.

**Tableau 1. Bilans de la période des captures des anguilles, en montaison dans l'ancienne échelle à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé de 1992 à 2014. Captures effectives lors des récoltes tous les 2-3 jours.**

Décade	Année	n	Période de capture			Température de capture °C			Record journalier de capture			
			P50	90% (jours)	100% (jours)	P50	90% (Δ)	100% (Δ)	n	Date	°C	
<b>1990</b>	<b>1992</b>	5613	25 mai	11 mai-24 juin (44 j)	30 avril-7 septembre (130 j)	21.1	15.5-23.4 (7.9)	14.9-25 (10.1)	1335	22 mai	23	
	<b>1993*</b>	506	21 mai	30 avril-7 juillet (38 j)	14 avril-18 septembre (167 j)	20.6	18.2-24.7 (6.5)	14.5-24.7 (10.2)	140	21 mai	21	
	<b>1995</b>	4240	31 mai	26 mai-5 juillet (40 j)	3 mai-6 octobre (156 j)	20.2	19.4-23.8 (4.4)	14.8-29.1 (14.2)	1132	31 mai	20	
	<b>1997</b>	2709	25 juin	16 mai-18 août (94 j)	4 avril-15 septembre (164 j)	20.4	17.1-25 (7.9)	12.3-25.8 (13.5)	248	25 juin	18	
	<b>1998**</b>	3061	8 juin	18 mai-7 septembre (112 j)	4 mai-5 octobre (154 j)	20.7	18.8-25.3 (6.5)	13.2-25.3 (12.1)	369	22 mai	21	
<b>2000</b>	<b>1999</b>	4664	12 juillet	15 mai-6 août (83 j)	19 avril-10 octobre (205 j)	23.9	19.1-24.3 (5.2)	10.5-25.8 (15.3)	981	12 juillet	24	
	<b>2000</b>	3365	5 juin	8 mai-20 juillet (73 j)	24 avril-29 septembre (158 j)	21.5	16.2-23.8 (7.6)	15.1-24.4 (9.3)	498	15 mai	22	
	<b>2001</b>	2915	29 mai	11 mai-28 août (108 j)	30 avril-1 octobre (154 j)	21.2	16.7-25 (8.3)	12.6-25 (12.4)	480	29 mai	19	
	<b>2002</b>	1787	7 juin	6 mai-5 août (91 j)	5 avril-17 septembre (165 j)	20.8	15-24.4 (9.4)	12-25 (13)	221	24 juin	24	
	<b>2003</b>	1842	11 juin	30 avril-18 juillet (79 j)	3 avril-27 août (164 j)	23.6	16.9-24.7 (7.8)	12.3-25.3 (13)	265	9 juin	24	
	<b>2004</b>	423	29 juillet	3 mai-23 août (112 j)	23 avril-1 octobre (161 j)	21.2	16.4-25.5 (9.1)	13.8-25.5 (11.7)	55	9 août	21	
	<b>2005</b>	703	24 juin	6 mai-25 juillet (80 j)	4 avril-30 septembre (179 j)	22.4	16.7-25.1 (8.4)	14.3-25.1 (10.8)	160	30 mai	23	
	<b>2006</b>	575	26 juin	12 mai-27 juillet (76 j)	24 avril-31 août (129 j)	22.9	17.6-27.3 (9.7)	12.5-27.3 (14.8)	79	26 juin	23	
	<b>2007</b>	731	18 juin	23 avril-30 août (129 j)	13 avril-23 octobre (193 j)	21	18.5-23.5 (5.2)	15.3-23.6 (8.3)	90	17 août	21	
	<b>2008</b>	2625	19 mai	9 mai-14 juillet (66 j)	23 avril-15 octobre (175 j)	20.7	19.1-22.1 (3.0)	14-24.8 (10.8)	786	19 mai	19	
	<b>2009</b>	574	3 juillet	27 mai-20 juillet (54 j)	17 avril-17 septembre (153 j)	25.3	19.7-25.3 (3.6)	15.5-25.3 (10.3)	170	6 juillet	25	
	<b>2010</b>	<b>2010</b>	248	2 juillet	26 mai-19 juillet (54 j)	29 avril-28 juillet (90 j)	25.8	19-26.3 (7.3)	17.2-27.1 (9.9)	89	2 juillet	26
		<b>2011</b>	208	6 mai	22 avril-19 juillet (88 j)	22 avril-10 octobre (171 j)	19.3	18-22.8 (4.8)	16.8-24.8 (8)	45	26 avril	20
		<b>2012</b>	317	21 juin	11 mai-23 août (104 j)	11 mai-10 Septembre (122 j)	20.4	16.1-22.7 (6.6)	16.1-25.4 (9.3)	49	16 juillet	22
		<b>2013</b>	265	25 juillet	10 juin-1 août (52 j)	25 avril-13 septembre (141 j)	24.4	18.5-25.5 (7.0)	14.2-25.5 (11.3)	61	25 juillet	25.5
<b>2014</b>		255	18 juin	30 mai-25 juillet (56 j)	26 mai-25 août (91 j)	21.2	19.3-22.9 (3.6)	18.2-24 (5.8)	110	18 juin	21.2	

\*\* Fin 1998: entrée en fonction de la nouvelle échelle

**Tableau 2.** Distribution des fréquences des longueurs et évolution des poids moyens et des taux d'argenture, des anguilles en migration de montaison dans l'ancienne échelle à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé de 1992 à 2014. \* Données non représentatives de la saison.  $\Delta$ , écarts des longueurs.

Décade	Année	n	Longueur totale, (mm)			Poids moyen, (g)	Conversion en anguilles argentées, (%)	
			P50	90% ( $\Delta$ )	100% ( $\Delta$ )		n	Biomasse
1990	1992	5613	285	230-443 (213)	140-600 (460)	51	59.0	45.8
	1993*	506	295	241-467 (226)	160-660 (500)	44	-	-
	1995	4240	315	259-540 (282)	190-840 (650)	69	59.1	45.7
	1997	2709	315	241-504 (262)	160-750 (590)	75	59.5	46.4
	1998**	3061	305	241-483 (242)	160-700 (540)	61	59.4	46.6
	1999	4664	305	247-487 (240)	170-710 (540)	57	59.1	45.9
2000	2000	3365	295	247-504 (257)	170-750 (580)	54	59.3	45.4
	2001	2915	315	230-463 (233)	140-650 (510)	58	59.5	45.5
	2002	1787	305	241-467 (226)	160-660 (500)	58	60.1	46.4
	2003	1842	325	246-414 (168)	194-730 (536)	68	22.6	37.3
	2004	423	325	354-418 (64)	195-780 (585)	95	26.7	46.2
	2005	703	325	244-512 (268)	200-798 (598)	77	28.2	47.4
	2006	575	325	233-512 (279)	190-830 (640)	86	31.8	52.4
	2007	731	315	234-472 (238)	192-662 (470)	74	29.8	46.8
	2008	2625	335	239-450 (211)	173-672 (499)	76	33.6	45.5
	2009	574	345	240-500 (260)	150-720 (570)	87	31.7	48.7
2010	2010	248	355	315-501 (186)	285-591 (306)	93	39.9	55.2
	2011	208	385	273-523 (250)	211-690 (479)	115	47.6	59.8
	2012	317	401	311-673 (362)	285-882 (597)	136	54.9	69.1
	2013	265	393	272-560 (288)	196-765 (569)	108	52.6	62.4
	2014	255	401	301-512 (211)	234-698 (464)	104	58.0	61.8

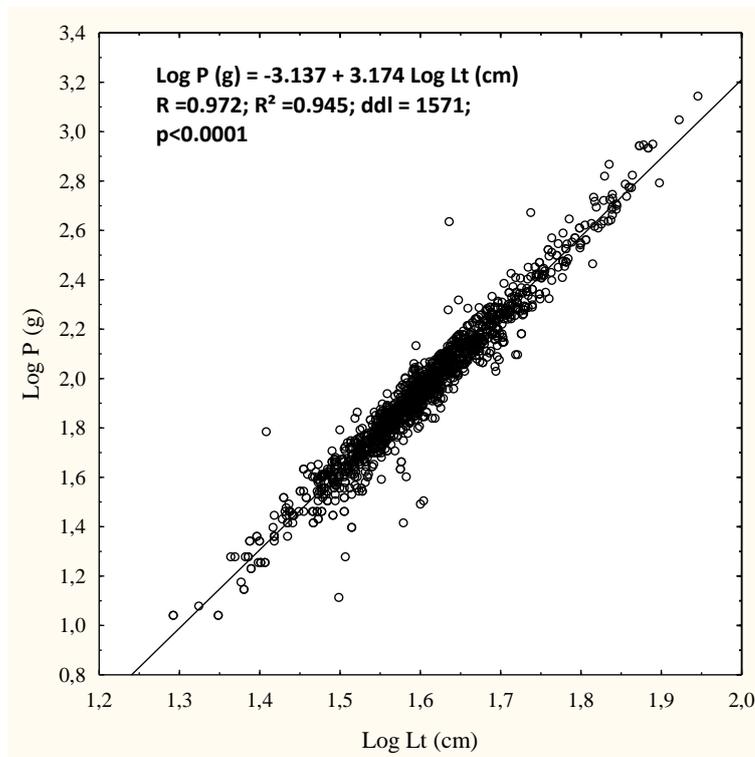
\*\* Fin 1998: entrée en fonction de la nouvelle échelle

### 1.3.3. Evolution de la taille et de l'indice d'argenture des anguilles

La distribution annuelle des fréquences des tailles des anguilles capturées en montaison dans l'ancienne échelle de 1992 à 2014 (tableau 1) montre que des anguilles de classes de tailles très diversifiées sont capturées chaque année à Lixhe. Cela pourrait traduire le fait que des anguilles en provenance de milieux divers et appartenant à des classes d'âges variés, seraient impliquées dans le processus annuel de migration de remontée à Lixhe. La relation entre la longueur totale des anguilles capturées dans l'ancienne échelle et le poids corporel est hautement significative ( $F = 3\ 511.91$  ;  $R = 0.972$  ;  $R^2 = 0.945$  ;  $ddl = 1571$  ;  $p < 0.0001$ , fig. 3).

La longueur minimale ( $F = 13.845$  ;  $R = 0.649$  ;  $ddl = 20$  ;  $p = 0.0015$ ), la longueur de 5% d'anguilles ( $F = 5.419$  ;  $R = 0.471$  ;  $ddl = 20$  ;  $p = 0.0311$ ) dans la distribution des fréquences des tailles de la tranche migrante des populations d'anguilles capturées et la longueur médiane ( $F = 62.495$  ;  $R = 0.876$  ;  $ddl = 20$  ;  $p < 0.00001$ ) ont significativement augmenté depuis 1992 chez les anguilles capturées dans l'ancienne échelle à poissons de Lixhe. Les accroissements les plus importants des tailles des anguilles ont été observés sur la longueur médiane (5 mm/an), suivi de la longueur minimale (4.1 mm/an) et enfin, de la

longueur de 5% d'anguilles de la distribution des fréquences des tailles (17 mm/décennie). Concomitamment avec l'accroissement de la longueur médiane des anguilles, le poids moyen (17.1 g/décennie) et le taux d'argenture associé à la biomasse (5.3%/décennie) ont aussi augmenté avec le temps chez les anguilles migrantes ( $F = 18.694-34.525$  ;  $R = 0.714-0.811$  ;  $ddl = 20$  ;  $p < 0.001$ ).

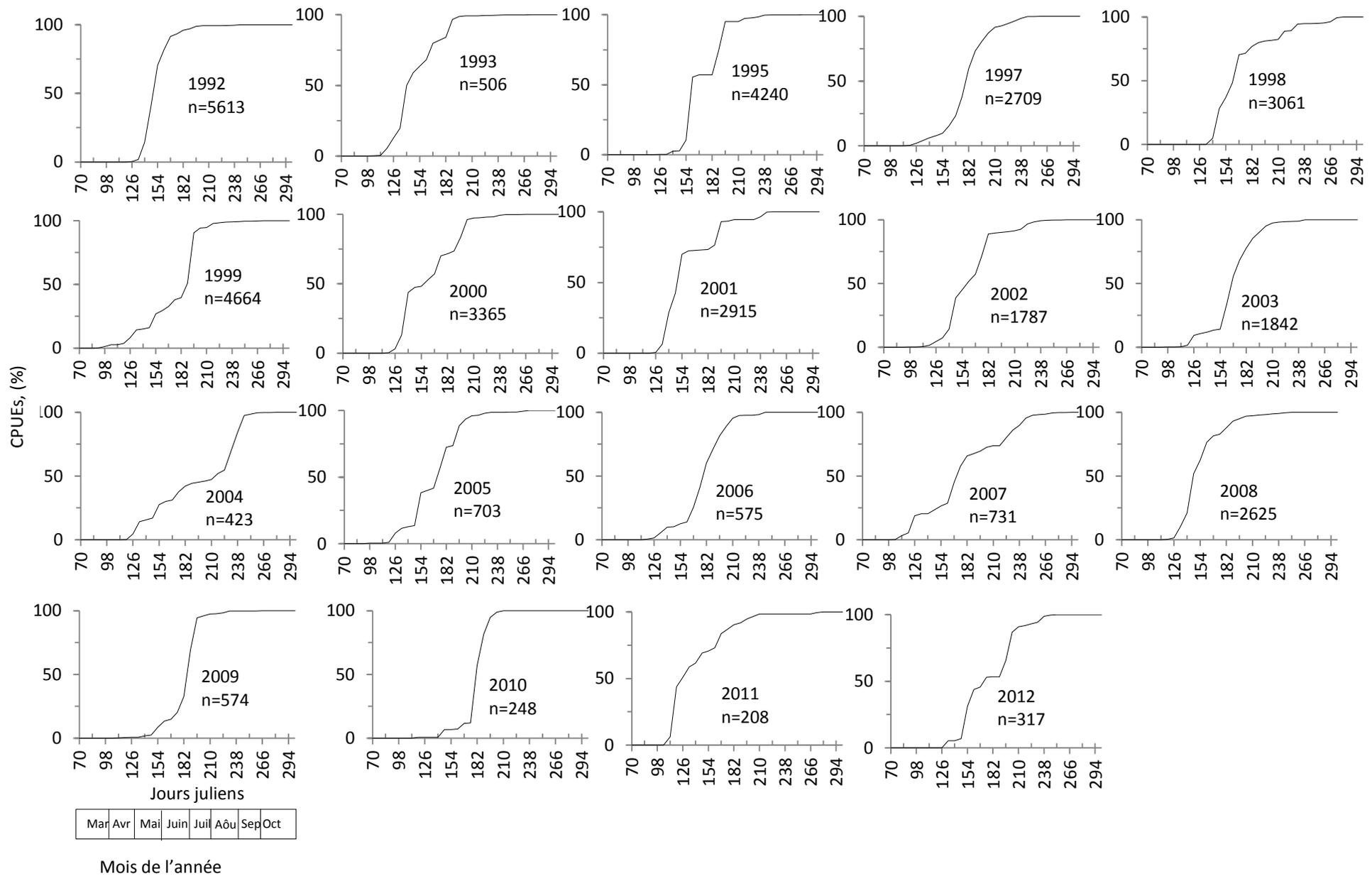


**Fig. 3.** Relation entre la longueur totale des anguilles capturées (Lt en mm) et leurs poids corporels (P en g), au cours de leurs montaisons dans l'ancienne échelle à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé, de 1992 à 2014.

En revanche, la longueur de 95% d'anguilles dans la distribution des tailles, la longueur maximale et les écarts des longueurs de 90% et 100% d'anguilles dans les populations migrantes à Lixhe n'ont pas significativement évolué depuis 1992 ( $F = 0.243-3.499$  ;  $R = 0.115-0.403$  ;  $ddl = 20$  ;  $p = 0.078-0.673$ ). Cette même constatation est faite en terme de taux de conversion en nombre d'anguilles argentées ( $F = 2.690$  ;  $R = 0.361$  ;  $ddl = 20$  ;  $p = 0.118$ ).

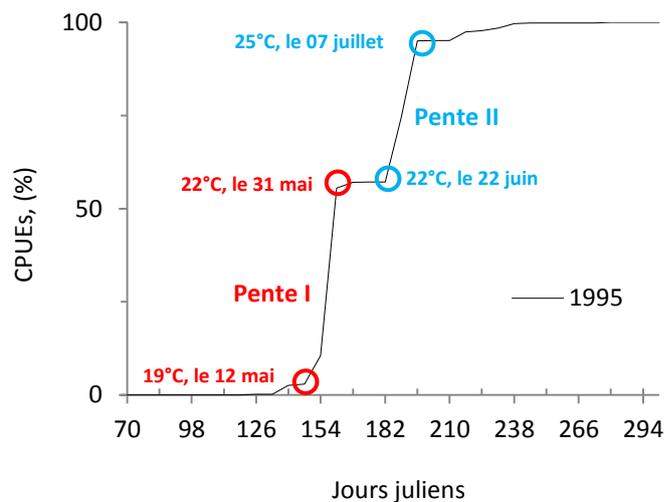
#### 1.3.4. Courbe des captures journalières d'anguilles

La courbe standardisée des captures journalières de 1992 à 2012 montre 33 pentes d'accroissements des captures des anguilles (fig. 4).



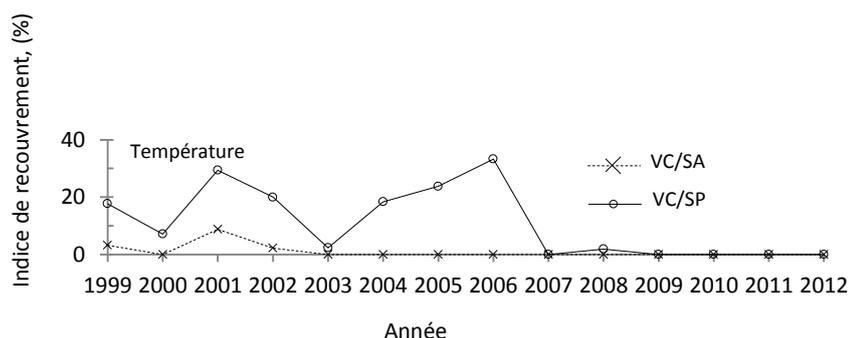
**Fig. 4.** Courbe standardisée des captures journalières cumulées (en %) des anguilles capturées, au cours de leur montaison dans l'ancienne échelle à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé de 1992 à 2012.

Sur la pente d'accroissement des captures des anguilles, le début d'accroissement des captures coïncide avec le début d'accroissement de la température de la Meuse. Les captures augmentent ensuite avec les accroissements de la température de l'eau, puis elles atteignent un pic avec des valeurs maximales de température et enfin, elles baissent avec le refroidissement du fleuve (fig. 5). La température est la variable environnementale la plus importante qui influence le déroulement (modérateur) du processus de migration de remontée chez l'anguille.



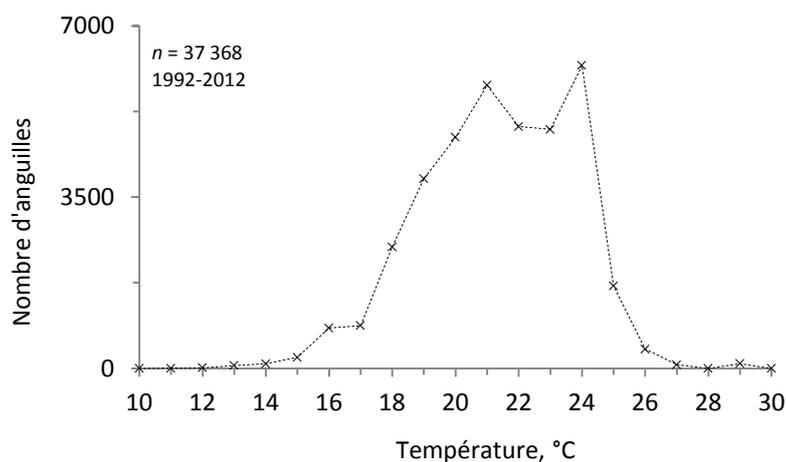
**Fig.5.** Variations des valeurs thermiques dans les pentes des accroissements des captures d'anguilles dans l'ancienne échelle à poissons en 1995.

Les indices de recouvrement entre les valeurs de température de l'eau pendant la saison de captures des anguilles, pendant la saison antérieure à la saison de capture et pendant la saison postérieure à la saison de capture, signalent un recouvrement très peu important entre les trois périodes (fig. 6). Le recouvrement maximum observé atteint le seuil de 8.8% des valeurs thermiques entre les paramètres des captures des anguilles et les paramètres de la saison antérieure à la saison de capture. Ce recouvrement ne dépasse pas le seuil maximum de 33.3% entre les paramètres thermiques des captures des anguilles et les paramètres thermiques de la saison postérieure à la saison de capture. Ceci démontre que les anguilles ne migrent qu'à une période spécifique de l'année caractérisée par des températures élevées de la Meuse. Cela fait de la variable environnementale température de l'eau, le facteur clé qui contrôle le début (déclencheur) du processus de migration des anguilles.



**Fig.6.** Indices de recouvrement entre les valeurs thermiques des captures des anguilles (VC), les valeurs thermiques de la saison antérieure à la saison de capture (SA) et les valeurs thermiques de la saison postérieure à la saison de capture (SP) pour les variables environnementales explicatives de la variabilité des captures journalières des anguilles au barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé de 1999 à 2012.

Par ailleurs, la distribution des fréquences de capture des anguilles en montaison dans l'ancienne échelle de 1992 à 2012 en fonction de la température de l'eau (fig. 7) révèle que les anguilles sont majoritairement (Probabilité exacte de Fisher,  $p < 0.0001$ ) capturées à des températures élevées (58.5% de 37 368 anguilles à 21-24°C), avec deux pics de capture observés à 21°C (15.5%) et 24°C (16.6%). La température de capture oscille entre un minimum de 10.5°C (1 anguille capturée le 16 avril 1999) et 29.1°C (99 anguilles, le 28 juillet 1995).



**Fig. 7.** Distribution des fréquences des anguilles en fonction de la température de capture au cours de leur saison de montaison dans l'ancienne échelle à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé de 1992 à 2012.

#### 1.4. Discussion

D'après les résultats des analyses statistiques effectuées, les principaux changements intervenus dans les populations migrantes d'anguilles en remontée dans l'ancienne échelle de Lixhe de 1992 à 2014 sont :

- la baisse drastique des populations migrantes,
- l'augmentation de la taille corporelle,
- l'accroissement du taux d'argenture,
- la hausse de la température minimale de montaison,
- la diminution des écarts thermiques des passages entre la première et la dernière anguille et des passages de 90% d'anguilles dans la distribution des fréquences de remontée dans l'ancienne échelle .

Au cours de ces années de monitoring, la variable environnementale température de l'eau a exercé une influence importante sur la répartition journalière des captures des anguilles en remontée à Lixhe. En revanche, aucun changement significatif n'a été décelé dans le temps sur la périodicité de migration des anguilles.

La chute du nombre d'anguilles en remontée à Lixhe observé dans cette étude, reflète bel et bien la réalité du déclin de l'espèce signalé à tous ses stades de développement et sur toute son aire de répartition géographique (Bonhommeau et al. 2008 ; MacNamara & McCarthy 2014 ; ICES 2014). En revanche, l'ouverture en fin 1998 d'une nouvelle échelle à poissons équipée d'un piège ne retenant pas des anguilles, biaise les données de nombre d'anguilles capturées en migration de remontée sur le site du Lixhe de 1999 à 2014. Toutefois, le travail réalisé en 2013 par marquage RFID et recapture (voir chapitre 2.1) permet d'estimer comment les anguilles se répartissent entre la nouvelle et l'ancienne échelle. Ainsi, même si on introduit un facteur de correction pour les captures après 1998, la tendance du déclin des captures se poursuit. Le niveau particulièrement élevé de remontée d'anguilles observé en 2008 pourrait être mis en relation avec le niveau élevé de recrutement en civelles transparentes observé en 2007 l'année de meilleur recrutement en civelles entre 2004 et 2012 dans la mer du nord (ICES 2013, 2014). L'année 2007 a également été l'année de meilleures captures en civelles transparentes à l'embouchure de l'Yser en Flandre en Belgique sur une série d'années allant de 2001 à 2011 (Belpaire et al. 2013). Il est fort probable que le recrutement élevé en civelles au cours d'une année dans la mer du nord impacte la remontée massive d'anguilles jaunes à Lixhe dans l'année qui suit par un phénomène de densité dépendance.

De façon concomitante avec la baisse démographique, la taille des anguilles capturées à Lixhe augmente. Cette constatation indique que le déclin observé des populations d'anguilles serait dû à un défaut des recrutements naturels (Moriarty 1990 ; Ovidio et al. 2013 ; MacNamara & McCarthy 2014). L'augmentation de la taille des anguilles associée à l'augmentation du taux d'argenture s'expliquerait par l'augmentation des proportions de petites anguilles qui restent dans la partie aval de Lixhe. Le manque de recrutements naturels en civelles induit des disponibilités accrues d'habitats créant ainsi des opportunités alimentaires importantes qui favoriseraient un taux de croissance élevé des anguilles. La variabilité interannuelle de la proportion de ces petites anguilles dans les fractions migrantes des populations expliquerait la variabilité des coefficients d'argenture entre deux années (exemple 2002 et 2003) avec des effectifs annuels similaires d'anguilles.

Par ailleurs, la variabilité des classes de tailles dans les fractions migrantes des populations d'anguilles traduit le fait que des anguilles impliquées dans le processus de migration de remontée à Lixhe se trouvent à différents stades de développements. Ceci démontre davantage la nécessité d'étudier la structure par âge et sexe et de comprendre l'histoire de vie de ces anguilles. Une telle connaissance permettrait de valider la fiabilité des résultats des taux d'argenture obtenus, lesquels sont actuellement basés sur une transposition d'un modèle démographique d'anguilles mis au point sur une population géographiquement éloignée de Lixhe. Elle apporterait également une précision très importante sur leur histoire de vie qui permettrait de mieux comprendre la hausse de la taille corporelle de capture. Cela s'avère particulièrement intéressant au regard de la relation très forte entre d'une part la taille de l'anguille et d'autre part, la fécondité chez les individus de sexe femelle. Dans le contexte actuel de grave régression démographique, les anguilles femelles ont intérêt à maximiser leur croissance pour espérer une amélioration future des recrutements naturels et ainsi sauver l'espèce de l'extinction. Le site de Lixhe géographiquement très éloigné de la mer serait une zone à structure par sexe biaisé en faveur des anguilles femelles qui vivent longtemps dans les cours d'eau avant l'échappement vers le site de reproduction (Ibbotson et al. 2002). L'échappement de l'anguille vers la mer dépend de l'acquisition de la maturité sexuelle qui dépend elle-même de la taille de l'anguille et la taille à l'échappement dépend à son tour du sexe de l'anguille (Durif et al. 2005 ; MacNamara & McCarthy 2014).

La température de l'eau s'est révélée être la variable déterminante dans l'explication de la variabilité des captures journalières des anguilles. La relation très étroite observée entre la température de l'eau et les captures journalières cumulées des anguilles montre aussi que la température influence fortement le déclenchement du processus de migration, la stimulation de l'activité migratoire et le contrôle du déroulement de migration chez l'anguille. Une période de migration similaire observée depuis 1992 démontre que les anguilles n'ont pas significativement modifié leur comportement de colonisation au fil du temps. Cela prouve à suffisance que le mécanisme de la migration des remontées des anguilles à Lixhe serait sous le contrôle d'un stimulus externe (en particulier une hausse des températures printanières et estivales, Moriarty 1986 ; Naismith & Knights 1988) associé à certains rythmes endogènes (Castonguay et al. 1990 ; Edeline et al. 2009). De même, la période de migration reportée dans l'étude est typique à celle reconnue à la famille des anguillidés à ce stade de la vie (Tesch 2003). La précision émise sur les dates de migration détermine le moment idéal pour des actions d'échantillonnage lors des études démographiques des anguilles. Une bonne connaissance des périodes de remontée permet aussi d'optimiser le fonctionnement des ouvrages hydroélectriques dont les modalités de fonctionnement peuvent influencer l'efficacité des passes migratoires.

Cette étude apporte des précisions sur les principaux changements intervenus dans les populations d'anguilles en migration de remontée à Lixhe, avec le déclin des recrutements naturels des populations. Parmi les changements les plus significatifs, il y a l'accroissement de la taille des anguilles migrantes. Cette situation aurait comme conséquence de biaiser davantage dans les populations migrantes d'anguilles le sex-ratio qui serait devenu en faveur des femelles et, de porter l'âge des anguilles vers les classes d'âge supérieures. Dans ce contexte, il serait pertinent et urgent élucider la structure par sexe et

âge de ces anguilles migrantes ainsi que leur histoire de vie (croissance, parcours), moyennant l'utilisation des avancées scientifiques et technologiques récentes moins invasives pour les poissons (Geffroy et al. 2013, Bureau du Colombier et al. 2015).

**ACTION 2. PIEGEAGE DANS LES ECHELLES A POISSONS, MARQUAGE ET SUIVI DES MIGRATIONS, SUIVI DES REPEUPEMENTS**

**2.1. ESTIMATION DU STOCK EN AVAL DE LIXHE ET UTILISATION DE SES ECHELLES A POISSONS**

### 2.1.1. Introduction

Les barrages hydroélectriques, les seuils et les écluses interfèrent avec la libre circulation des poissons dans les cours d'eau (Sheer & Steel 2006). Chez l'anguille européenne *Anguilla anguilla*, ces ouvrages sont répertoriés parmi les causes de sa grave régression démographique. Lors de la phase de colonisation des eaux douces pour la croissance, ces obstacles peuvent réduire l'espace vital de l'anguille et empêcher l'accès à ses habitats de croissance (Lucas & Baras 2001 ; Ordeix et al. 2011). De même, sur les rivières, la présence de barrages hydroélectriques provoque une mortalité par passage à travers les turbines hydroélectriques. Elle entraîne également une accumulation importante d'individus aux pieds des obstacles se soldant par un retard dans la colonisation vers l'amont et par une hausse de mortalité (Baran et al. 2011). Face aux défis de la restauration de l'espèce, le rétablissement de la libre circulation dans les eaux douces est une des options soutenues par l'Union européenne. A travers son Règlement Anguille instituant des mesures de reconstitution du stock, l'Europe oblige chaque état membre à l'appliquer un plan de gestion visant à agir sur chacun des facteurs de déclin de l'anguille (UE 2007 ; Vlietinck et al. 2008 pour le Plan pour la Belgique) notamment pour le cas d'obstacles sur des rivières dont il faut assurer le franchissement.



**Figure 1:** Barrage de Lixhe à Visé sur la Meuse belge près de la frontière avec les Pays-Bas.

Les recherches menées au cours des dernières décennies ont permis d'améliorer considérablement notre connaissance sur la biologie et l'écologie de l'anguille européenne (Ibbotson et al. 2002 ; Tesch 2003 ; Durif et al. 2005 ; Ovidio et al. 2013). Paradoxalement, l'utilisation des ouvrages de contournement d'obstacles comme les passes à poissons par les anguilles au cours de leur processus de colonisation vers l'amont dans des grands fleuves, reste encore peu connue. Ceci est d'autant plus vrai encore dans des sites fluviaux où coexistent des ouvrages anciens aux côtés des ouvrages modernes.

En Belgique sur le site de Lixhe à Visé (figure 1), un barrage hydroélectrique de 8.2 m de hauteur constitue le plus haut obstacle physique sur l'ensemble de la Meuse internationale (Philippart & Rimbaud 2005). Ce barrage est infranchissable lors de la

migration de remontée de toutes les espèces de poissons. Dépourvu d'écluse, la connectivité longitudinale de la Meuse est assurée grâce aux deux échelles à poissons : l'ancienne échelle et la nouvelle échelle, construites sur le site du barrage de Lixhe respectivement en 1980 et 1998. L'ancienne échelle qui fonctionne à faible débit, est située dans la Meuse entre la centrale hydroélectrique et les déversoirs. La nouvelle échelle construite pour assurer la remontée des grands poissons migrateurs comme le saumon atlantique et la truite de mer, est placée sur la rive droite de la Meuse et fonctionne à haut débit. Le site du barrage de Lixhe est l'une des routes de migration des anguilles qui entrent en Wallonie à partir de la Mer du Nord via les Pays-Bas. Le contrôle historique de l'ancienne échelle à poissons (depuis 1992) permet de connaître le flux migratoire des anguilles. Mais, les individus capturés ne représentent qu'un échantillon de la population aval et il est important d'estimer la taille de cette population par des méthodes statistiques. D'autre part, l'ouverture de la nouvelle échelle en 1998 a ouvert une nouvelle voie de passage pour les anguilles et il est primordial de s'attarder sur la répartition des anguilles entre les deux échelles. Ces connaissances sont également indispensables pour évaluer de la contribution potentielle locale de la Meuse au stock des géniteurs panmictiques en accord avec le plan de gestion de l'anguille à l'UE qui fixe l'objectif d'échappement des géniteurs à 40% de la meilleure estimation de biomasse pour chaque bassin hydrographique.

Cette étude réalisée au cours de l'année 2013 au niveau du site de barrage de Lixhe sur la Meuse belge près de la frontière avec les Pays-Bas a donc pour objectif :

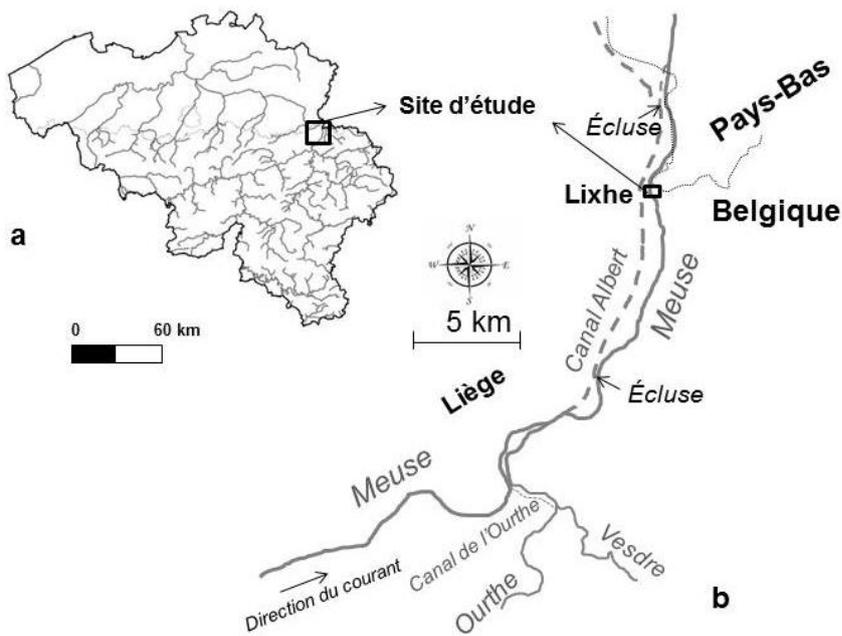
- D'estimer le nombre d'anguilles recrutées par migration de remontée en Wallonie à partir de la mer du Nord via les Pays-Bas.
- De préciser la structure par stades de développement des anguilles capturées en montaison dans l'ancienne échelle et la nouvelle échelle.
- D'évaluer le taux d'utilisation de ces deux échelles à poissons de configurations différentes situées à Lixhe par les anguilles en migration de remontée.

## **2.1.2. Matériel et méthode**

### **2.1.2.1. Site d'étude**

L'étude a été réalisée sur le cours belge de la Meuse au niveau du barrage de Lixhe à Visé (50°45'N, 5°40'E, 323 km amont de la Mer du Nord) près de la frontière avec les Pays-Bas (fig. 2). Construit en 1980, ce barrage d'une largeur de 200 m crée une dénivellation maximale de 8.2 m entre les plans d'eau amont et aval. Depuis l'embouchure du fleuve, il constitue le 8<sup>ème</sup> obstacle à la colonisation des eaux du bassin de la Meuse par des poissons migrateurs amphibiotiques. Dépourvu d'écluse de navigation, le barrage de Lixhe est potentiellement contournable par le canal Albert via un canal de jonction dans la Meuse 6.7 km à l'aval du barrage. Le barrage de Lixhe est équipé d'une centrale hydroélectrique de 23 200 kW et de deux passes à poissons. La première échelle à poissons appelée communément ancienne (ou petite) échelle, a été construite en 1980 dans la Meuse et accolée à la centrale hydroélectrique du côté des déversoirs. Elle fonctionne avec un débit faible et possède une configuration ancienne constituée de bassins successifs de dimensions réduites communiquant par une échancrure verticale (tableau 1). L'ancienne échelle bénéficie d'un système de piégeage constitué d'un bassin-piège avec un cône amovible permettant l'entrée dans le bassin piège et d'un treillis métallique à fines mailles empêchant

la sortie vers la Meuse. La deuxième échelle à poissons appelé la nouvelle (ou grande) échelle a été construite en 1998 sur la rive droite de la Meuse. La nouvelle échelle possède des bassins successifs plus grands que ceux de l'ancienne échelle. Ces bassins communiquent les uns aux autres par une fente verticale large de 0.40 m qui laisse transiter un débit élevé de 1.5 m<sup>3</sup>/s complété par un débit d'appoint à l'entrée de l'ouvrage. Le dispositif de piégeage placé à la sortie de l'échelle vers le canal d'aménée ne retient pas les anguilles parce qu'il est constitué d'une cage-piège cubique de 1.80 m de côté avec des tubes en inox espacés de 4 cm.



**Figure 2:** Carte de localisation du site d'étude au barrage de Lixhe à Visé sur la Meuse belge près de la frontière avec les Pays-Bas.

Au niveau du site de Lixhe, la Meuse présentait des extrêmes thermiques de 3.1-26.8°C en 2013 contre 6-24°C en 2014 et des débits extrêmes de 17-1168 m<sup>3</sup>/s en 2013 contre 12-1009 m<sup>3</sup>/s en 2014.

**Tableau 1: Principales caractéristiques techniques de deux échelles à poissons : configuration et emplacement des pièges dans les bassins au barrage de Lixhe à Visé sur la Meuse belge.**

Caractéristiques	Ancienne échelle	Nouvelle échelle
<b>a. Configuration</b>		
Type d'échelle à poissons	A bassins	A bassins
Passage entre bassins successifs	Echancrure profonde réglable	Fente verticale
Année d'entrée en fonction	1980	Fin 1998
Longueur totale de l'échelle, (m)	±121	145 (entre l'ouverture aval et le piège de capture)
Dénivellation entre bassins, (m)	0.15	0.3
Pente moyenne de l'échelle, (m/100m)	6.8	5.4
Nombre des bassins	56	26
Longueur des bassins, (m)	1.4-5.35	4.7-9.7
Largeur des bassins, (m)	0.9-1.6	2.5
Tirant d'eau dans les bassins, (m)	1.0	1.5
Volume sous eau des bassins, (m <sup>3</sup> )	1.3-5.9	17.6-36.4
Débit max. admis dans l'échelle, (m <sup>3</sup> /s)	0.3	1.0
Puissance dissipé, (W/m <sup>3</sup> )	-	50-140
Débit d'attrait, (m <sup>3</sup> /s)	-	4.0
Dispositif de piégeage	Vidange d'un bassin	Cage relevée
<b>b. position du bassin (à partir de l'amont)</b>		
Piège	2 (Bassin cône-piège)	Canal d'amenée (cage)
Bassins de repos	-	7, 12 et 18 (1 nasse par bassin)
Antenne RFID	6	2
Nasses	-	canal d'amenée (5 nasses)

### 2.1.2.2. Capture, marquage, recapture et détection

La capture a eu lieu dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe, lesquelles étaient contrôlées deux fois par semaine lors de la saison de migration 2013. Les pièges sont constitués d'un bassin piège dans l'ancienne échelle (figure 3). Dans la nouvelle échelle, les pièges sont composés de nasses et d'un filet puisque la cage-piège de cette échelle ne retient pas les anguilles (fig. 4). La plupart des anguilles capturées dans les deux échelles ont été marquées par insertion chirurgicale de transpondeurs RFID à radiofréquence implantés dans la cavité abdominale de l'anguille. Les anguilles marquées ont été relâchées en un site unique situé sur la rive droite de la Meuse à 270 m en aval du barrage de Lixhe (largeur du secteur fluvial,  $192 \pm 11$  m), dans l'heure qui suivait leur capture (fig. 5). Ce point de relâcher devrait permettre une dispersion au hasard des anguilles marquées dans l'ensemble de la population d'anguilles non marquées de manière à obtenir une probabilité identique de capture entre une anguille marquée et une anguille non marquée et, d'éviter de favoriser une échelle particulière lors de la recapture et de la détection.

Les deux échelles ont été équipées d'une antenne de détection automatique de transpondeurs RFID (fig. 3 & 4). Les anguilles marquées et ensuite relâchées en aval peuvent refaire le passage dans les échelles pour être recapturées et/ou automatiquement détectées à leur passage sous les antennes de détection RFID installées dans les deux échelles à poissons. Les anguilles qui ont été recapturées sont ensuite relâchées 200 m en amont du barrage de Lixhe pour continuer leur progression de colonisation.

Chaque capture, recapture et détection a été associée :

- à la température de l'eau de la Meuse,
- au débit de la Meuse,
- à la variation du débit de la Meuse par rapport au débit du jour avant,
- à la phase lunaire.

Pour des individus détectés plusieurs fois, la direction finale du mouvement a été identifiée d'après le nombre pair ou impair de détections. Un nombre pair reflète un demi-tour de l'anguille et un nombre de détection impair une direction finale vers l'amont.

La capture, le marquage et la recapture dans les deux échelles à poissons ont eu lieu en une seule saison de migration en 2013. En revanche, la détection automatique dans les deux passes à poissons a été effectuée au cours de deux saisons consécutives de migration en 2013 et 2014. La capture d'anguilles dans le bassin-piège de l'ancienne échelle a été également opérée en deux saisons : en 2013 et 2014.

Les observations réalisées ont porté sur :

- **le taux de recapture** (nombre d'anguilles recapturées x 100 / nombre d'anguilles marquées) ;
- **le taux de détection** (nombre d'anguilles détectées x 100 / nombre d'anguilles marquées) ;
- **l'heure de détection** ;
- **le taux de fidélité** à l'échelle de capture (nombre d'anguilles recapturées dans l'échelle de capture x 100 / nombre total d'anguilles recapturées ou encore nombre d'anguilles détectées dans l'échelle de capture x 100 / nombre total d'anguilles détectées) ;
- **le taux d'utilisation** de chaque échelle à poissons par rapport au nombre total d'anguilles capturées dans les deux échelles (nombre total d'anguilles capturées dans une échelle x 100 / nombre total d'anguilles capturées dans les deux échelles) et ;
- **le taux d'utilisation** de deux échelles par rapport à la population estimée en aval du barrage de Lixhe (nombre total d'anguilles capturées dans les deux échelles x 100 / nombre total d'anguilles estimées en aval de deux échelles).

La production potentielle en anguilles argentées dans la fraction migrante de la population d'anguilles a été évaluée grâce à l'application de modèle DemCam, développé pour les stocks d'anguilles de la Camargue (De Leo & Gatto 1995). Ce modèle est robuste pour décrire la démographie d'autres populations d'anguilles (MacNamara & McCarthy 2014). Il est basé sur les classes des tailles des anguilles jaunes auxquelles sont attribuées en fonction des sexes, des taux de conversion en anguilles argentées possible dans l'année de capture de l'anguille jaune (classes des longueurs /coefficient d'argenture : mâles, <31cm / 0 ; 31-37 cm / 0.35 ; 37-43 cm / 0.85 et, femelles, 43-49 cm / 0.4 ; 49-55 cm / 0.6 ; 55-61 cm / 0.8 et >61 cm / 0.9).

Le test de Kruskal-Wallis suivi si nécessaire du test de Mann-Whitney, a été utilisé pour comparer :

- la longueur totale entre les anguilles capturées, les anguilles marquées, les anguilles recapturées et les anguilles détectées ;
- la longueur totale au marquage chez les anguilles détectées par échelle et saison de migration ;
- le débit de la Meuse enregistré le jour de la détection chez les anguilles détectées par échelle et saison de migration ;
- la variation du débit de la Meuse entre le jour de la détection et le jour précédant la détection chez les anguilles détectées par échelle et saison de migration.

La comparaison des taux d'utilisation de deux échelles par les anguilles, des taux d'abondances des anguilles par position amont et position aval par rapport aux détecteurs et des ratios entre le nombre d'anguilles détectées et le nombre d'anguilles recapturées par échelle et saison de migration, a été réalisée avec le test de  $\chi^2$ .

Le test de probabilité exacte de Fisher a servi à la comparaison :

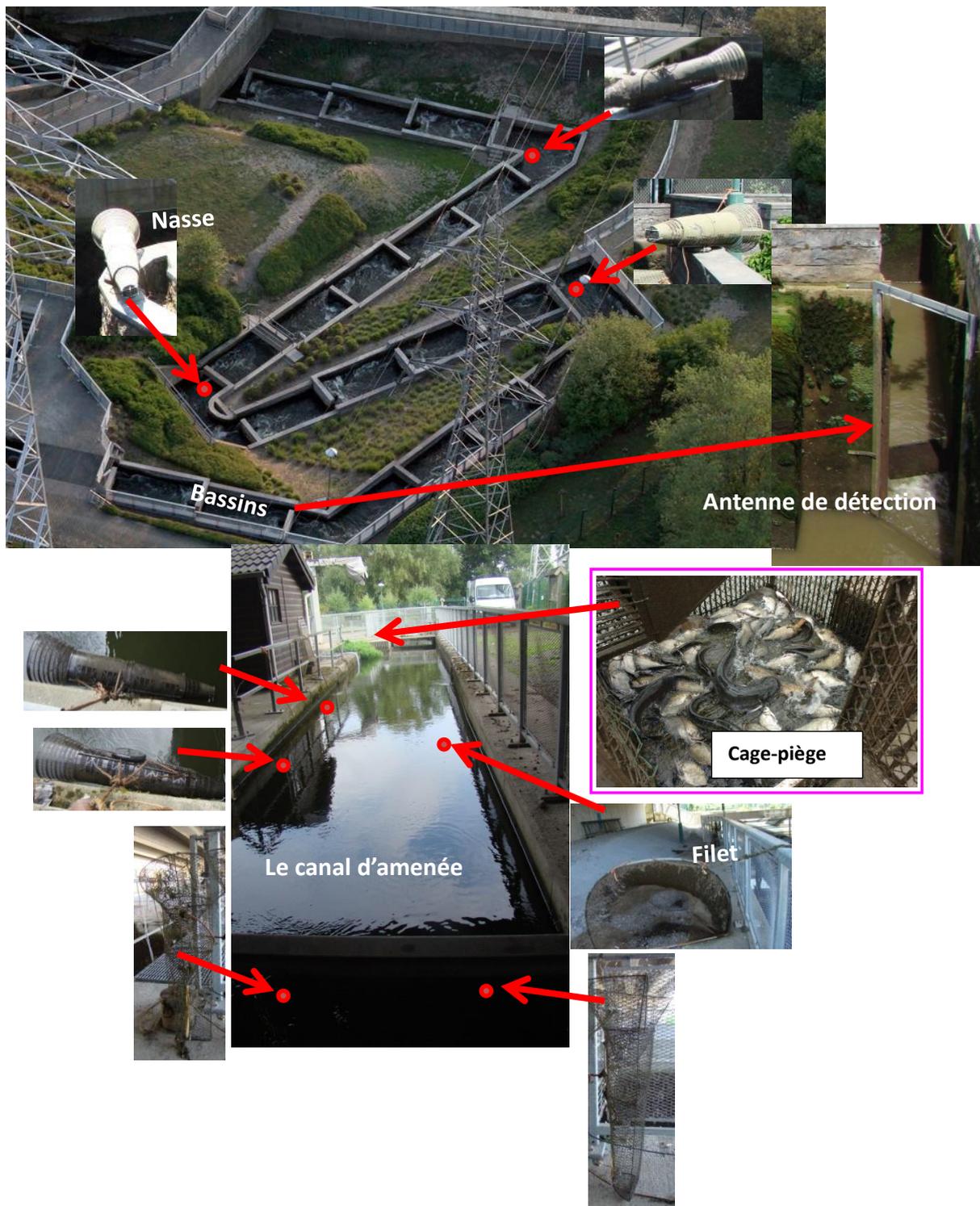
- de groupes d'anguilles d'après leur comportement vis-à-vis de l'échelle de capture,
- d'abondances des anguilles par phase lunaire,
- d'abondances des anguilles par heure d'activité migratoire.

La corrélation de Spearman (Spearman Rank Correlation) a été utilisé pour déterminer la relation entre :

- la longueur totale au marquage des anguilles et l'échelle de détection ;
- la longueur totale au marquage et la saison de détection ;
- la longueur totale au marquage et le débit le jour de la détection ;
- la longueur totale au marquage et la variation du débit entre le jour de la détection et le jour avant la détection.



**Figure 3:** L'ancienne échelle à poissons : l'antenne de détection RFID, le bassin-piège, le cône-piège et les anguilles piégées dans le bassin-piège, au barrage de Lixhe à Visé sur la Meuse belge.



**Figure 4:** La nouvelle échelle à poissons du barrage de Lixhe à Visé : l'antenne de détection RFID ; la cage-piège ne retenant pas les anguilles et les nasses et le filet, avec leurs emplacements lors du piégeage des anguilles.



**Figure 5:** Vue aérienne (Google Earth) du site d'étude au barrage de Lixhe à Visé sur la Meuse belge : l'ancienne échelle (AE), la nouvelle échelle (NE), le site de relâcher et les sites de détection RFID.

### 2.1.2.3. Identification de la population migrante

L'identification de la population migrante d'anguilles à Lixhe a été effectuée par analyse des caractères anatomiques externes sur un sous-échantillon représentatif de 50 anguilles de 316 – 775 mm. Les paramètres suivants ont été mesurés (en mm) sans sacrifier l'animal : longueur totale du corps (Lt), longueur de la nageoire pectorale (Ln), diamètres vertical (Dv) et horizontal (Dh) de l'oeil, épaisseurs verticale (Ev) et horizontale (Eh) du corps. La livrée a été également caractérisée sur la base du contraste des couleurs et du développement de la ligne latérale. Les indices morphométriques utilisés ont été calculés d'après les formules suivantes (Pankhurst 1982 ; Durif et al. 2005) :

L'indice lLn pour comparer les longueurs des nageoires pectorales :

$$lLn = (Ln / Lt) \times 100$$

L'indice oculaire OI pour comparer les surfaces oculaires :

$$OI = ((Dv + Dh)/4)^2 \times (\pi / Lt) \times 100$$

L'indice IEC pour comparer les épaisseurs corporelles :

$$IEC = ((Ev + Eh)/4)^2 \times (\pi / (0,059 \times Lt^2)) \times 1000$$

L'application de ces descripteurs morphologiques a permis d'identifier des groupes d'anguilles qui ont été comparés entre eux grâce au test de probabilité exact de Fisher pour l'abondance des groupes et au test de Kruskal-Wallis suivi du test de Mann-Whitney pour les indices morphométriques.

### **2.1.2.3. Estimation des populations en aval du barrage de Lixhe**

L'estimation du flux migratoire des anguilles à Lixhe a été effectué d'après les formules modifiées de Schnabel (pêches successives, chaque pêche suivie de marquage et de relâcher des anguilles marquées) décrites ci-dessous :

$$\text{Estimation de la population : } N = (\sum C_t \times \sum M_t) / (\sum R_t + 1)$$

$$\text{Variance de l'estimation: } V(N) = N^2 / \sum R_t$$

$$\text{Intervalle de confiance 95\% de l'estimation : } IC = N \pm (t\alpha, (n - 1) \times \sqrt{V(N)}) \text{ avec pour}$$

le temps t :

C, nombre d'anguilles capturées

M, nombre d'anguilles marquées et relâchées

R, nombre d'anguilles recapturées par la méthode de capture-marquage-recapture (CMR),

t $\alpha$ , valeur lue sur la table de Student ( $\alpha = 0.05$ )

n, nombre de jours de pêche

### **2.1.3. Résultats**

#### **2.1.3.1. Estimation du flux d'anguilles : en une seule saison de migration 2013**

##### **2.1.3.1.1. Bilans des captures, marquages, recaptures et détections**

Les bilans des captures, des marquages, des recaptures et des détections des anguilles au cours de la saison de migration 2013 montrent que 435 anguilles sont capturées, parmi lesquelles 91% d'anguilles (n = 396) ont été équipées d'une marque RFID (tableau 2). De ces anguilles marquées, n = 147 anguilles (37,1%) ont été détectées ultérieurement via les antennes alors que seulement n = 27 anguilles (6.8%) ont été recapturées.

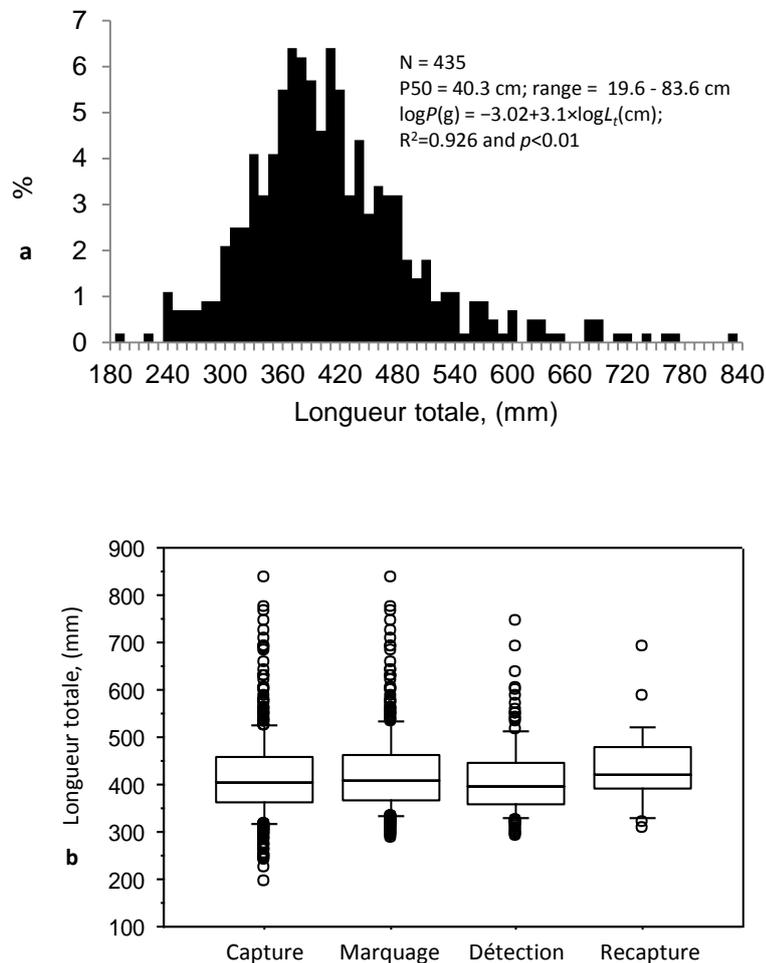
**Tableau 2:** Bilans des captures, marquages, recaptures et détections des anguilles, dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé pendant la saison de migration 2013. Stratification par semaine des données journalières de pêche. Captures dans la NE au moyen de nasses et par vidanges complète.

Semaines	Dates	Capture		Marquage		Recapture		Détection	
		AE	NE	AE	NE	AE	NE	AE	NE
17	22-28/4	1	-	1	-	-	-	-	-
18	29/4-5/5	1	-	1	-	-	-	-	-
19	6/5-12/5	6	-	6	-	-	-	-	-
20	13/5-19/5	2	-	2	-	-	-	-	-
21	20/5-26/5	-	-	-	-	-	-	-	-
22	27/5-2/6	-	-	-	-	-	-	-	-
23	3/6-9/6	1	-	1	-	-	-	-	-
24	10/6-16/6	10	-	10	-	-	-	3	1
25	17/6-23/6	59	47	48	45	1	2	7	3
26	24/6-30/6	16	17	15	15	-	2	-	3
27	1/7-7/7	6	2	4	2	-	-	1	3
28	8/7-14/7	17	9	15	7	2	2	7	7
29	15/7-21/7	11	16	11	14	-	2	15	9
30	22/7-28/7	69	35	64	31	5	5	40	14
31	29/7-2/8	58	31	56	28	2	3	6	10
32	5/8-11/8	10	7	9	7	1	-	2	-
33	12/8-18/8	-	-	-	-	-	-	-	-
34	19/8-25/8	-	-	-	-	-	-	-	-
35	26/8-1/9	2	-	2	-	-	-	-	-
36	2/9-8/9	1	-	1	-	-	-	-	-
37	9/9-15/9	1	-	1	-	-	-	-	-
<b>S/total</b>		<b>271</b>	<b>164</b>	<b>247</b>	<b>149</b>	<b>11</b>	<b>16</b>	<b>81</b>	<b>50</b>
<b>Recapture NE</b>			-	-	-	-	-	-	16
<b>Capture totale (correction)</b>			237	-	-	-	-	-	-
<b>Total</b>		<b>271</b>	<b>237</b>	<b>247</b>	<b>149</b>	<b>11</b>	<b>16</b>	<b>81</b>	<b>66</b>
CPUE, range		0-69	0-47	0-64	0-45	0-5	0-5	0-8 (le 23/7	0-4
date CPUE max		(le 25/7)	(le 21/6)	(le 25/7)	(le 21/6)	(le 25/7)	(le 25/7)	et le 24/7)	(le 20/7)
Nombre des jours des pêches = 48									

La taille corporelle des anguilles capturées en 2013 varie entre 196 et 836 mm et n'est pas significativement différente (test de Kruskal-Wallis,  $p > 0.05$ ) de la taille d'autres groupes d'anguilles constitués des anguilles marquées, des anguilles recapturées et des anguilles détectées (fig. 6).

L'analyse de la capture par unité d'effort (CPUE-nombre d'anguille par jour de pêche, de marquage, de recapture et de détection) en tant qu'indice d'abondance pour toutes les opérations réalisées (capture, marquage, recapture, détection), révèle des variations entre

les jours d'effort avec des valeurs maximales obtenues au mois de juillet (entre le 20/7 et 25/7, correspondant à la 29<sup>ème</sup> et 30<sup>ème</sup> semaine de l'année 2013).



**Figure 6 :** Distribution des fréquences des longueurs des anguilles capturées (a) et comparaison des tailles corporelles (b) entre les anguilles capturées (n = 435), les anguilles marquées (n = 396), les anguilles détectées (n = 147) et les anguilles recapturées (n = 27), dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé pendant la saison de migration 2013 (22/04 au 19/09).

Pour estimer le nombre total d'anguilles susceptibles de remonter par les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe, le nombre d'anguilles capturées dans les nasses et le filet placés dans la nouvelle échelle a été corrigé. Une relation linéaire hautement significative a été établie entre le nombre d'anguilles capturées dans les pièges de la nouvelle échelle et le nombre total d'anguilles présentes lors de quatre journées de mise à sec diurne de cette échelle. Cette relation est décrite comme : le nombre total d'anguilles capturées au quotidien dans la nouvelle échelle =  $0.6014 + 1.725 \times$  le nombre d'anguilles piégées ( $F = 734$  ;  $R^2 = 0,997$  ;  $ddl = 3$  ;  $p = 0,0014$ ). Ce modèle statistique porte le nombre total d'anguilles estimé dans la nouvelle échelle à 237 individus. Ceci conduit à évaluer

l'efficacité des pièges (nasses et filet) installés dans la nouvelle échelle à 56.5% pour une sélectivité des tailles de 309 – 836 mm. Cette performance élevée de capture serait imputable à la présence de nombreux pièges à mailles fines retenant les anguilles installés à de nombreux endroits : une nasse dans chacun des trois bassins de repos en aval du détecteur de la nouvelle échelle et quatre nasses et un filet dans le canal d'amenée d'eau dans l'échelle en amont du détecteur. Les 237 anguilles de la nouvelle échelle cumulées aux 271 anguilles capturées dans l'ancienne échelle, porte à  $n = 508$  le nombre total d'anguilles en migration de remontée dans les deux échelles de Lixhe **en 2013**.

Entre les deux échelles, le test du  $\chi^2$  ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'une répartition en égale proportion des anguilles susceptibles de remonter par les deux échelles à poissons (ratio NE : AE, 1 : 1.14,  $p > 0.05$ ), ni l'hypothèse d'une répartition en égale proportion des anguilles marquées recapturées (1 : 1.5,  $p > 0.05$ ) au cours de leur montaison dans les deux échelles. En revanche, ce test révèle une proportion d'anguilles marquées détectées significativement plus élevée (1 : 1.7,  $p < 0.0001$ ) dans l'ancienne échelle que dans la nouvelle échelle. De même, l'ancienne échelle montre un taux d'utilisation par les anguilles marquées détectées nettement plus élevé (1 : 1.2,  $p < 0.001$ ) que celui de la nouvelle échelle.

#### 2.1.3.1.2. Estimation du stock en aval des échelles

Par l'application de la formule modifiée de Schnabel, la méthode de capture – marquage – recapture (CMR) donne une estimation du stock d'anguilles en aval des échelles à **6 152** individus (soit une densité évaluée à 1 187 anguilles par ha), avec un intervalle de confiance ( $\alpha = 0.05$ ) de 3 770 – 8 534 anguilles (soit une densité de 727 – 1 646 anguilles/ha) (tableau 3). Ceci pourrait traduire qu'à partir du nombre total de 508 anguilles capturées dans les deux échelles, approximativement 8.3% de la population d'anguilles en aval du barrage de Lixhe migre vers l'amont en transitant par les deux échelles à poissons. Sur base de la distribution des fréquences des longueurs, cette population représente une biomasse de 0.738 t (densité 142 kg/ha), avec un intervalle de confiance ( $\alpha = 0.05$ ) de 0.452 – 1.024 t (87 – 198 kg/ha).

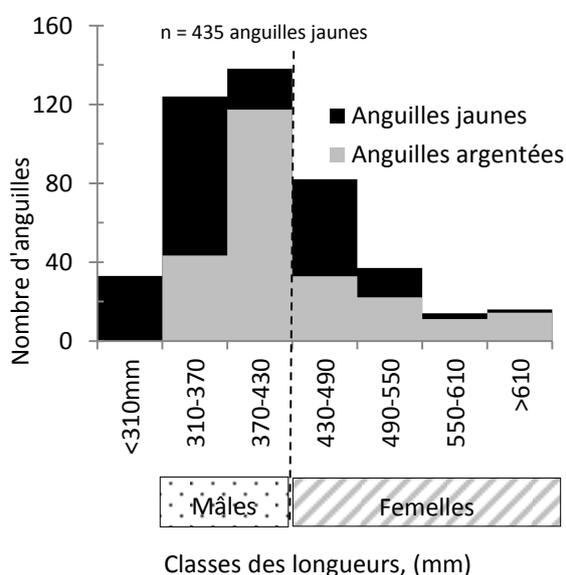
**Tableau 3: Estimation du stock de la population d'anguilles en aval des échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé, en saison de migration 2013.**

Méthode	Capture (C)	Marquage (M)	Recapture (R)	Population estimée				Intervalle de confiance (IC) 95%				
				N	Biomasse		Densité		Limite inférieure		Limite supérieure	
					(t)	N/ha	kg/ha	N	(t)	N	(t)	
CMR	435	396	27	6152	0.738	1187	142.4	3770	0.452	8534	1.024	

### 2.1.3.1.3. Production potentielle en anguilles argentées

Le modèle DemCam est établi sur la base des classes des longueurs totales des anguilles jaunes capturées en montaison auxquelles sont attribuées des taux de conversion en anguilles argentées au cours de l'année de capture (fig. 7). L'application de ce modèle indique que 54.3% d'anguilles jaunes (soit en biomasse, 63.4%) capturées au cours de la saison de migration de remontée 2013 à Lixhe peuvent s'argenter dans la même année.

D'après la méthode CMR, la production potentielle en anguilles argentées en aval des échelles de Lixhe serait de 3 322 anguilles argentées (en biomasse 0.468 t ; densité 90 kg/ha), avec un intervalle de confiance ( $\alpha = 0.05$ ) de 2 036 – 4 608 anguilles argentées (soit biomasse 0.287 – 0.649 t ; densité 55 – 125 kg/ha). Mais, ces estimations peuvent surestimer la production réelle en anguilles argentées puisque la méthode Demcam ne distingue le sexe des anguilles qu'à partir de la taille de 43 cm. Certaines anguilles considérées comme mâles avec un coefficient de conversion élevé, peuvent être des jeunes femelles (coefficients de conversion plus bas) encore en croissance pour plusieurs années avant leur échappement. Ceci est d'autant plus vrai puisque dans la présente étude les anguilles n'ont pas été sexées.



**Figure 7:** Production potentielle en anguilles argentées dans la fraction d'anguilles jaunes capturées dans les deux échelles à poissons au cours de la saison de migration 2013.

## **2.1.3.2. Utilisation des échelles à poissons par la méthode capture-marquage-détection**

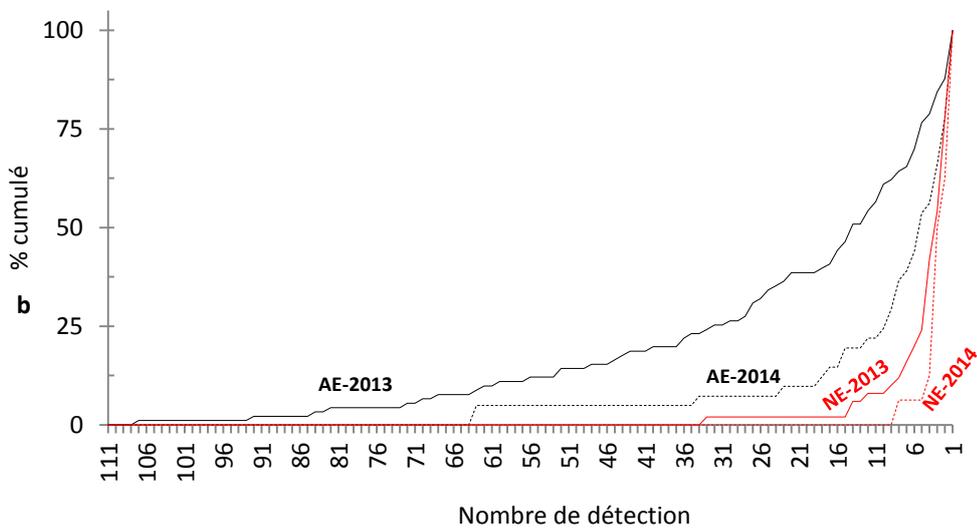
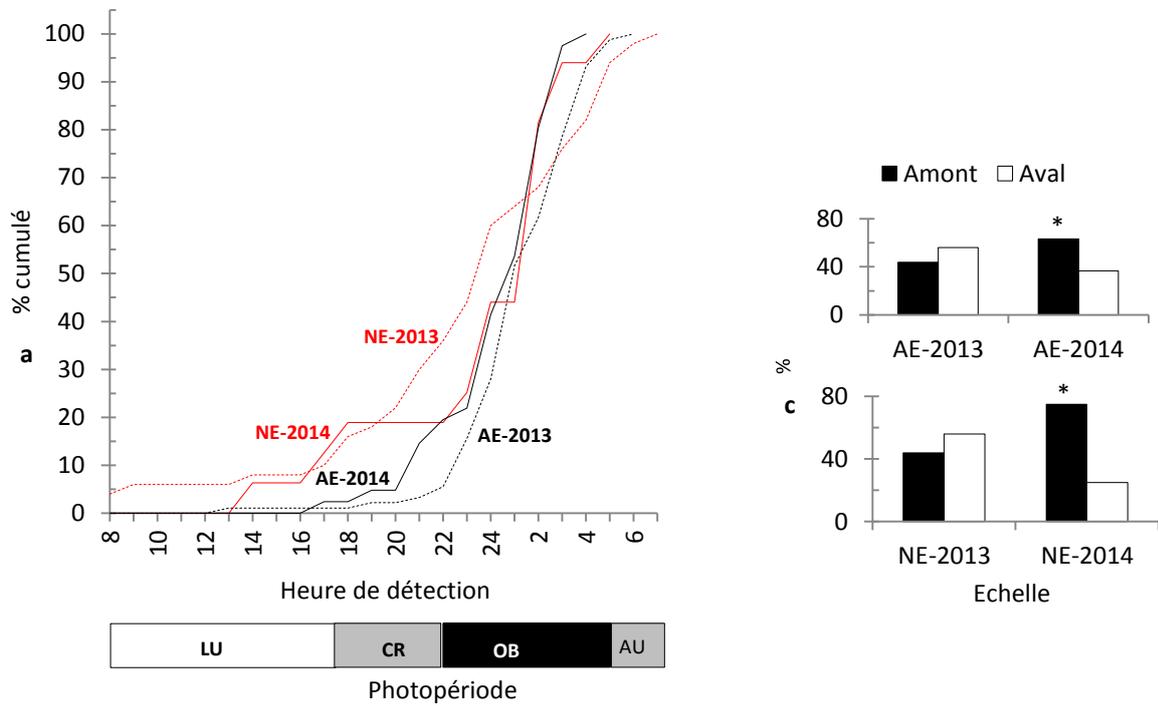
### **2.1.3.2.1. Rythmes de passages dans les échelles**

Les heures des passages et le nombre des passages des anguilles dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe illustrés sur la figure 8 montrent que les anguilles remontent via les échelles essentiellement au cours de la nuit entre 22h00 et 4h00 (test de probabilité exact de Fisher,  $p < 0.05$ ). La plupart des anguilles ont été détectées plusieurs fois sous les détecteurs. Ceci montre que la remontée des anguilles via les échelles s'effectue parfois lentement, ce qui engendre des détections multiples qui reflètent des changements de directions.

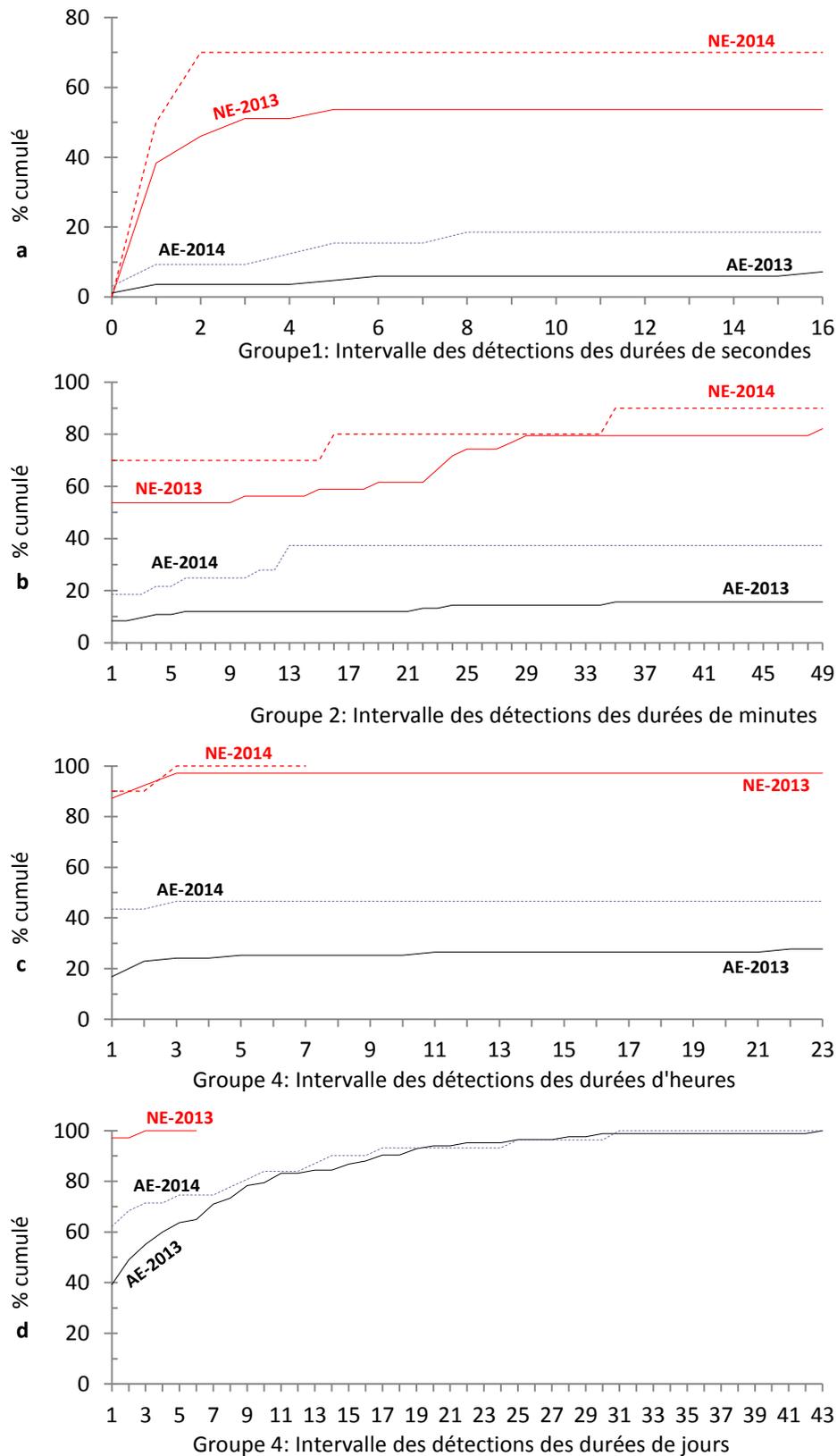
Au cours des saisons de migration 2013 et 2014, les détections multiples ont été moins étalées dans la nouvelle échelle que dans l'ancienne échelle en termes de nombre de détection et de temps d'intervalle entre la première détection et la dernière détection (fig. 9). Les détections multiples ont été moins nombreuses dans la nouvelle échelle (médiane = 3 en 2013-2014 ; maximum = 33 en 2013 et 8 en 2014) par rapport aux nombres de détections enregistrés dans l'ancienne échelle (médiane = 14 en 2013 et 5 en 2014 ; maximum = 107 en 2013 et 63 en 2014). Les détections plus nombreuses dans l'ancienne échelle peuvent être attribuées à la présence d'un obstacle physique (la grille du bassin-piège) à la libre circulation vers l'amont, lequel provoque une multiplication de tentatives des passages entre chaque contrôle de l'échelle et probablement un comportement de retraite vers l'aval.

Par ailleurs, la proportion d'anguilles détectées une seule fois est plus élevée dans la nouvelle échelle (>22%) que dans l'ancienne échelle (<22%). Au cours de la saison de migration 2013, la proportion des anguilles en amont des détecteurs installés dans les échelles ne diffère pas significativement (test du  $\chi^2$ ,  $p > 0.05$ ) de celle des anguilles situées en aval (fig. 9). En revanche, pendant la saison de migration 2014, la proportion d'anguilles détectées situées du côté amont par rapport aux détecteurs apparaît significativement plus élevée par rapport à la proportion d'anguilles détectées positionnées en aval ( $p < 0.05$ ), indépendamment de l'échelle.

Le temps d'intervalle entre la première détection et la dernière détection varie en fonction de la saison de migration et de l'échelle à poissons. Cet intervalle de temps apparaît plus court dans la nouvelle échelle (maximum = 3 jours) que dans l'ancienne échelle (maximum = 43 jours). Entre saisons de migration, le temps d'intervalle entre la première détection et la dernière détection est plus court en 2014 (médiane = 1 seconde ; 90% entre 1 seconde et 3 heures) qu'en saison 2013 (médiane = 3 secondes ; 90% entre 1 seconde et 3 jours) dans la nouvelle échelle. En revanche, dans l'ancienne échelle, ce temps d'intervalle est plus long au cours de la saison 2014 (médiane = 3 jours ; 90% entre 1 seconde et 17 jours) par rapport à la saison 2013 (médiane = 1 jour ; 90% entre 1 seconde et 14 jours). Ceci suggère que certaines anguilles résident quelques jours dans les échelles avant de continuer leur colonisation vers l'amont.



**Figure 8:** Heure (a) et nombre (b) de détection des anguilles lors de leurs passages sous les antennes de détection automatique installées dans les deux échelles à poissons et positionnements en amont et en aval (c) des anguilles par rapport aux détecteurs en saisons de migration 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle ; NE-2013 n = 51; AE-2013 n = 88; NE-2014 n = 16; AE-2014 n = 41; LU, lumière ; CR, crépuscule ; OB, obscurité ; AU, aurore ; \* p <0.05, test du Khi<sup>2</sup>.

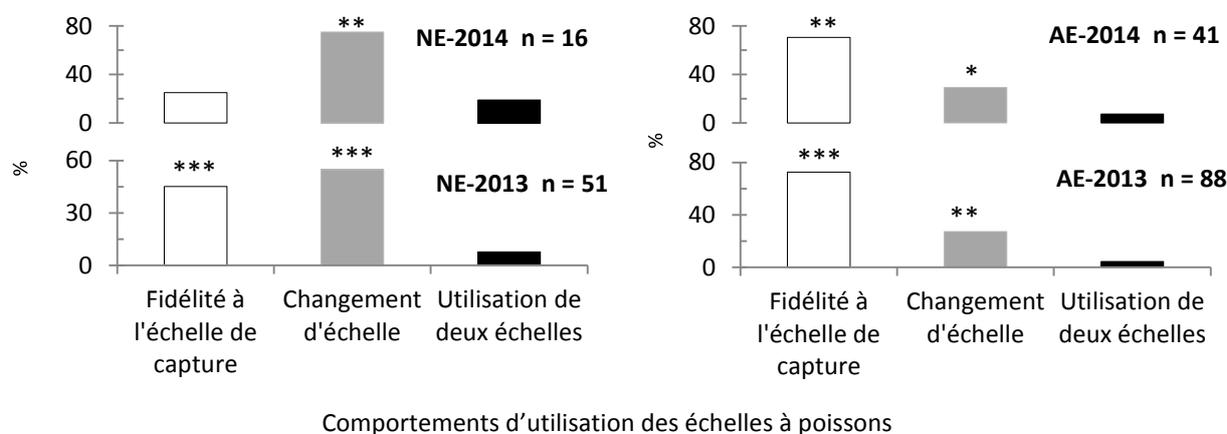


**Figure 9:** Fréquences relatives cumulées (en %) des nombres d'anguilles en fonction de l'intervalle de temps entre la première et la dernière détection en détections multiples des anguilles lors de leurs passages sous les antennes de détection automatique installées dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé en saisons de migration 2013 – 2014. Intervalle des détections des durées de secondes (a), de minutes (b), d'heures (c) et de jours (d). NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle ; NE-2013 n = 51; AE-2013 n = 88; NE-2014 n = 16; AE-2014 n = 41.

### 2.1.3.2.2. Fidélité à l'échelle de capture

L'analyse de l'utilisation des échelles à poissons du barrage de Lixhe révèle que certaines anguilles marquées réutilisent leur échelle de capture après leur relâcher en aval du barrage (fig.10). Ce comportement est appelé « fidélité à l'échelle de capture ». Dans l'ancienne échelle, on observe des proportions significativement plus élevées (test de probabilité exact de Fisher,  $p < 0.001$ ) d'anguilles qui expriment ce comportement par rapport à celles d'anguilles qui changent d'échelle à leur deuxième passage. En revanche, dans la nouvelle échelle, ce comportement n'apparaît qu'à l'année du marquage des anguilles (la saison 2013), laquelle montre une proportion d'anguilles fidèles à la nouvelle échelle égale ( $p > 0.05$ ) à celle des anguilles qui changent d'échelle. Entre les deux échelles, la proportion d'anguilles qui changent d'échelle est plus élevée dans la nouvelle échelle (>50%, annuellement) par rapport à l'ancienne échelle (<30% par an).

Certaines anguilles ont été détectées dans les deux échelles à poissons au cours d'une même saison de migration (tableau 4). D'autres anguilles ont été détectées durant deux saisons consécutives de migration en 2013 – 2014 (tableau 5). Le premier groupe d'anguilles utilise au cours d'une même saison de migration d'abord l'ancienne échelle avant d'être ultérieurement détecté dans la nouvelle échelle. Ce groupe représente moins de 6% d'anguilles détectées chaque année. Le second groupe d'anguilles n'atteint pas le seuil de 8% des 195 anguilles détectées ( $n = 15$ ) en saisons 2013 – 2014, et utilisent à 100%, l'ancienne échelle lors de la première saison de migration. A la deuxième saison de migration, 33.3% de ces 15 anguilles ( $n = 5$ ) ont changé d'échelle et ont été détectées dans la nouvelle échelle alors que 66.7% ( $n = 10$ ) sont revenues dans l'ancienne échelle, une année après leur passage dans cet ouvrage de franchissement. Toutes ces constatations démontrent que l'ancienne échelle est une route de migration de premier choix pour de nombreuses anguilles qui colonisent les secteurs fluviaux en amont du barrage de Lixhe. La remontée des anguilles dans les échelles à poissons de Lixhe a lieu à des conditions écologiques variées de phase lunaire, d'hydrologie et de température pendant la saison de migration.



**Figure 10:** Comportements d'utilisation de deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé par les anguilles détectées, en saisons de migration 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle; AE, ancienne échelle ; seuil de significativité \* $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.001$  et \*\*\*  $p < 0.0001$  du test de probabilité exact de Fisher.

**Tableau 4:** Utilisation des échelles à poissons chez les anguilles détectées dans les deux échelles de Lixhe au cours d'une même saison de migration en 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle ; Lt, longueur totale ; P, poids ; s, seconde ; min, minute ; h, heure ; j, jour ; NL, nouvelle lune ; PL, pleine lune ; LC, la lune est croissante ; LD, la lune est décroissante ;  $\Delta$ , variation.

Année des suivis de détection	Capture et marquage					Détection							Paramètres à la première détection				
	Anguille	Date	Échelle	Lt, (mm)	P, (g)	N°	Échelle	Date	Heure	Nombre de détection	$\Delta$ temps entre la première et la dernière détection	Position finale	$\Delta$ temps entre la remise à l'eau et la première détection, (j)	Phase lunaire	T, (°C)	Débit, (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta$ débit j- j <sup>-1</sup> , (m <sup>3</sup> /s)
<b>2013</b>	AAEA035	21/06/2013	NE	549	199	1	AE	27/07/2013	00:06:46	25	3j	Amont	19	LD	25,5	134,9	+63,7
						2	NE	2/08/2013	05:19:02	1	-	Amont	42	LD	25,0	84,6	+1,9
	AAEA042	21/06/2013	NE	379	73	1	AE	24/06/2013	23:40:26	23	19j	Amont	3	LC	23,9	74,1	-2,2
						2	NE	15/07/2013	06:15:32	3	2s	Amont	24	LD	20,2	160,9	-0,6
	ACB4ACD	19/06/2013	AE	390	77	1	AE	18/07/2013	23:20:29	27	8j	Amont	29	LC	23,9	74,1	-2,2
						2	NE	27/07/2013	02:10:11	2	1s	Aval	38	LD	25,5	134,9	+63,7
	AD1D731	22/07/2013	AE	482	190	1	AE	24/07/2013	03:13:26	16	3j	Aval	2	PL	25,6	82,4	-3,0
						2	NE	29/07/2013	03:42:19	1	-	Amont	7	LD	25,5	78,3	-83,3
<b>2014</b>	AAEA056	21/06/2013	NE	420	103	1	AE	28/06/2014	02:04:48	15	9j	Amont	372	NL	21,2	65,5	+53,3
						2	NE	10/07/2014	13:40:33	8	35min	Aval	384	LC	18,5	486,0	+249,0
	AAEA080	21/06/2013	AE	361	73	1	AE	14/06/2014	02:24:37	15	14j	Amont	358	PL	22,5	72,3	-1,2
						2	NE	23/07/2014	17:04:22	1	-	Amont	397	LD	23,4	77,1	+0,5
	AD1C93A	1/08/2013	AE	335	45	1	AE	1/07/2014	02:42:02	6	5j	Aval	334	LC	20,7	50,9	-1,2
						2	NE	23/07/2014	02:54:09	1	-	Amont	387	LD	23,4	72,3	-1,2

**Tableau 5:** Utilisation des échelles à poissons de Lixhe chez les anguilles détectées au cours de deux saisons consécutives de migration en 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle ; Lt, longueur totale ; P, poids ; s, seconde ; min, minute ; h, heure ; j, jour ; NL, nouvelle lune ; PL, pleine lune ; LC, la lune est croissante ; LD, la lune est décroissante ;  $\Delta$ , variation.

Capture et marquage					Détection							Paramètres à la première détection				
Anguille	Date	Échelle	Lt, (mm)	P, (g)	N°	Échelle	Date	Heure	Nombre de détection	$\Delta$ temps entre la première et la dernière détection	Position finale	$\Delta$ temps entre la remise à l'eau et la première détection, (j)	Phase lunaire	T, (°C)	Débit, (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta$ débit j-j <sup>-1</sup> , (m <sup>3</sup> /s)
AD1D71C	19/07/2013	NE	397	76	1	AE	24/07/2013	04:27:49	11	2j	Amont	5	PL	25,6	82,4	-3,0
					2	NE	10/06/2014	04:46:28	3	2s	Amont	313	LC	22,4	154,0	+3,4
AAEA0A5	4/07/2013	AE	461	124	1	AE	20/07/2013	23:22:47	12	16s	Aval	16	LC	24,4	76,4	+4,5
					2	NE	12/06/2014	03:18:08	1	-	Amont	343	PL	23,3	98,6	-23,5
ACB42FC	13/05/2013	AE	389	97	1	AE	15/06/2013	03:47:59	36	17j	Aval	46	LC	19,6	161,5	-8,5
					2	NE	11/07/2014	02:13:07	3	16min	Amont	424	PL	18,7	294,7	-191,3
AAEA080	21/06/2013	AE	369	73	1	AE	20/07/2013	00:20:01	14	2j	Aval	29	LC	24,4	76,4	+4,5
					2	AE	14/06/2014	02:24:37	15	14j	Amont	358	PL	22,5	72,3	-1,2
					3	NE	23/07/2014	17:04:22	1	-	Amont	397	LD	23,4	77,1	+0,5
AAEA05B	21/06/2013	NE	361	67	1	AE	16/07/2013	05:12:16	30	7j	Aval	25	LC	23,2	97,6	+10,5
					2	AE	11/04/2014	02:24:44	3	13j	Amont	294	LC	15,4	85,1	+9,2
AAEA07C	21/06/2013	AE	560	220	1	AE	11/07/2013	03:12:43	10	15j	Aval	20	LC	22,4	83,6	-9,7
					2	AE	11/04/2014	20:59:47	7	13min	Amont	294	LC	15,4	85,1	+9,2
AD1D72D	22/07/2013	AE	465	146	1	AE	25/07/2013	00:46:41	68	11j	Aval	3	PL	25,5	66,7	-15,7
					2	AE	11/04/2014	02:00:36	1	-	Amont	325	LC	15,4	85,1	+9,2
ACB4ABA	17/06/2013	AE	350	63	1	AE	21/06/2013	00:35:11	6	2h50min	Aval	4	LC	21,9	242,9	+77,9
					2	AE	22/04/2014	23:57:19	3	1h	Amont	309	LD	15,8	69,9	-24,4
AAEA05F	21/06/2013	AE	416	101	1	AE	23/07/2013	03:00:41	70	25j	Aval	32	PL	25,7	85,4	-5,2
					2	AE	23/04/2014	01:41:55	1	-	Amont	306	LD	16,0	82,5	+12,6
AD1D712	19/07/2013	AE	397	76	1	AE	23/07/2013	23:49:11	44	5j	Aval	4	PL	25,7	85,4	-5,2
					2	AE	25/04/2014	02:39:51	1	-	Amont	280	LD	17,2	95,9	+8,2
AAEA077	21/06/2013	AE	476	116	1	AE	24/07/2013	00:56:54	11	2j	Amont	3	PL	25,6	82,4	-3,0
					2	AE	26/04/2014	00:37:57	6	2j	Aval	309	LD	17,4	72,7	-23,3
AD1D6FB	11/07/2013	NE	414	95	1	AE	16/07/2013	22:59:44	10	1j	Aval	5	LC	23,2	66,8	+10,5
					2	AE	26/04/2014	16:57:57	34	31j	Aval	261	LD	17,4	72,7	-23,3
AD1D751	25/07/2013	AE	358	70	1	AE	27/07/2013	22:05:27	27	4j	Amont	2	LD	25,5	134,9	+63,7
					2	AE	28/04/2014	21:14:02	1	-	Amont	273	NL	17,1	62,6	+0,4
AD1D701	11/07/2013	AE	428	112	1	AE	26/07/2013	01:27:12	36	1j	Aval	15	LD	25,6	71,3	+4,6
					2	AE	2/05/2014	01:29:13	5	1j	Amont	295	LC	17,4	68,7	-23,2
AD1C99A	29/07/2013	AE	355	68	1	AE	8/08/2013	02:54:07	6	35min	Aval	10	NL	24,4	63,5	+9,8
					2	AE	23/06/2014	02:50:12	9	1j	Amont	329	LD	20,7	22,9	+8,8

### **2.1.3.2.3. Conditions écologiques**

#### **2.1.3.1.3.1. Relation entre le marquage, la détection et la recapture des anguilles**

La relation entre d'une part le marquage des anguilles effectué en une seule saison de migration (en 2013) et d'autre part la détection et la recapture de ces anguilles marquées pendant deux saisons consécutives (en 2013 – 2014) (tableau 6), montre que les anguilles marquée relâchées en aval du barrage de Lixhe remontent par les échelles majoritairement dans la même saison que le marquage (taux de détection = 33.1% des 396 anguilles marquées ; taux de recapture = 6.6%). Dans la saison de migration qui suit le marquage, ces taux chutent à 11.6% pour la détection et à 1% pour la recapture dans l'ancienne échelle, la nouvelle échelle n'ayant pas été équipée en pièges à anguilles. Ces résultats démontrent que les anguilles qui atteignent le site de Lixhe ne possèdent pas une même capacité à remonter la Meuse vers l'amont. Le taux de détection actuellement observés à 44.7% des anguilles marquées et celui de recapture à 7.6% pour les deux saisons de migration réunies sont susceptibles d'accroître au cours des saisons à venir. De même, la détection en 2013 – 2014 de 9 anguilles marquées au cours des saisons de migration 2010-2012 ainsi que la recapture en 2013 d'une anguille marquée en 2012 (tableau 7) semblent conforter cette hypothèse.

Au cours des saisons dans chaque échelle, le test du  $\chi^2$  confirme la performance supérieure de la détection RFID ( $p < 0.0001$ ) par rapport à la recapture. Ceci permet de formuler des hypothèses selon lesquelles toutes les anguilles qui fréquentent l'ancienne échelle ne seraient pas retenues par le bassin-piège de l'ancienne échelle. De même, l'activité migratrice des anguilles pourrait bien s'étendre de quelques jours au-delà des limites des périodes de migration qui sont actuellement basées sur des captures obtenues du bassin-piège de l'ancienne échelle. Ceci soulève la sérieuse question de l'étanchéité du bassin-piège de l'ancienne échelle, lequel mérite une attention particulière pour améliorer le rendement des captures et des recaptures des anguilles. De même, dans l'ancienne échelle, l'antenne de détection est placée en aval du cône-piège, il serait probable que certaines anguilles détectées ne pénètrent pas dans le bassin-piège.

**Tableau 6:** Relation entre la détection, la recapture et l'utilisation de deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé chez les anguilles marquées en 2013 puis détectées en saisons de migration 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle ; \*\*p <0,001 et \*\*\*p <0,0001 (test du Khi<sup>2</sup>).

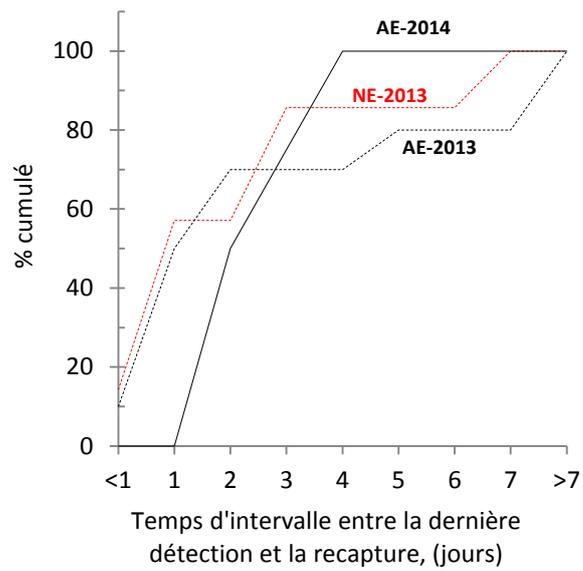
		Année de marquage												
		2010			2011			2012			2013			
Année	Échelle	Détection	Détection	Recapture	Ratio									
		(a)	(a)	(b)	a : b									
		n total	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	a : b
<b>2013</b>			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NE	51	-	-	-	-	-	1	-	-	50	16	3,1:1***	
	AE	88	2	-	-	1	-	4	1	4:1	81	10	7,4:1***	
	Ratio NE:AE	1:1,7***	-	-	-	-	-	1:4	-	-	1:1,6**	1,5:1	-	
<b>2014</b>			-	-	-	-	-	1	-	-	15	-	-	
	NE	16	-	-	-	-	-	-	-	-	41	4	10,3:1***	
	AE	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ratio NE:AE	1:2,6***	-	-	-	-	-	-	-	-	1:2,7***	-	-	

**Tableau 7: Caractéristiques des anguilles marquées avant la saison de migration 2013, détectées en 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle. Lt, longueur totale ; P, poids ; s, seconde ; min, minute ; h, heure ; j, jour ; NL, nouvelle lune ; PL, pleine lune ; LC, la lune est croissante ; LD, la lune est décroissante ;  $\Delta$ , variation.**

Anguille	Capture et marquage				Détection						Paramètres à la première détection				
	Date	Échelle	Lt, (mm)	P, (g)	Échelle	Date	Heure	Nombre de détection	$\Delta$ temps entre la première et la dernière détection	Position finale	$\Delta$ temps entre la remise à l'eau et la détection, (j)	Phase lunaire	T, (°C)	Débit, (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta$ débit j-j <sup>-1</sup> , (m <sup>3</sup> /s)
AAE9EB6	9/07/2012	AE	311	36	<b>NE-2014</b>	15/06/2014	02:20:25	2	1s	Aval	696	LD	21,8	59,0	-18,1
-	-	-	-	-	<b>AE-2014</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AAE9F8F	30/08/2012	AE	330	37	<b>NE-2013</b>	13/07/2013	03:35:33	4	29min	Aval	318	LC	22,6	102,9	+3,6
AAE9EDF	16/07/2012	NE	505	187	<b>AE-2013</b>	8/06/2013	03:12:18	3	39s	Amont	337	NL	18,7	180,8	-9,4
AAE9EC9	9/07/2012	AE	311	36	<b>AE-2013</b>	17/06/2013	02:10:45	6	7s	Aval	394	LC	19,2	145,8	-8,7
AAEA021	6/07/2012	AE	638	419	<b>AE-2013</b>	22/06/2013	03:22:17	1	-	Amont	338	PL	20,5	313,9	+71,0
A199	14/07/2010	AE	296	29	<b>AE-2013</b>	23/06/2013	00:11:41	4	5h	Aval	1078	PL	19,9	278,2	-35,7
96B490B	29/04/2011	AE	291	44	<b>AE-2013</b>	10/07/2013	20:53:46	17	15j	Amont	805	LC	22,9	93,3	-1,8
AAE9EB6	9/07/2012	AE	311	36	<b>AE-2013</b>	19/07/2013	23:55:14	68	30j	Aval	375	LC	24,4	24,4	+71,9
A130	5/07/2010	AE	375	72	<b>AE-2013</b>	24/07/2013	02:50:44	4	6s	Aval	1118	PL	25,6	82,4	-3,0

Les résultats de la relation entre la détection des anguilles et leur recapture révèlent que les meilleurs taux de recapture des anguilles détectées varient en fonction de la saison de migration et de l'intervalle de temps entre la détection et la recapture (fig. 11). Au cours de la saison 2013 dans les deux échelles, le taux de recapture des anguilles détectées est relativement plus élevé lorsque le délai entre la détection et la recapture ne dépasse pas un jour d'intervalle. Le délai pour un taux élevé de recapture des anguilles détectées passe en saison 2014 à 2 et 4 jours dans l'ancienne échelle. La nouvelle échelle n'étant pas équipée de piège à anguille ne présente aucun résultat de recapture en 2014. Ceci signifierait que les meilleurs rendements des piégeages des anguilles dans les échelles peuvent être obtenus si les pièges sont contrôlés tous les jours. La recapture de toutes les anguilles détectées la veille du jour des contrôles des pièges (tableau 8) semble confirmer cette hypothèse. Ces résultats montrent aussi que les anguilles détectées aux premières heures du jour (entre 0h00 et 3h30) peuvent être capturées le jour de leur détection.

Une anguille de 497 mm – 181 g avec la marque ACB42FA montre une trajectoire particulière. En effet, cette anguille a été capturée pour la première fois le 10/05/2013 dans l'ancienne échelle puis relâchée sur le site unique de remise à l'eau des anguilles marquées en aval des échelles. Le 21/06/2013 à 03h:24min:17s, la même anguille a été détectée positionnée en amont par rapport au détecteur installé dans la nouvelle échelle. Elle sera recapturée le même jour dans une nasse placée dans le canal d'amenée en amont du détecteur dans la même échelle. Après la recapture, cette anguille a été relâchée 200 m en amont des échelles. Mais, un jour après son relâcher et pendant plusieurs jours, elle est de nouveau détectée plusieurs fois dans la nouvelle échelle (tableau 8). Finalement, le 24/07/2013 à 22h:13min:44s, cet individu est redétecté dans la nouvelle échelle et ensuite recapturé le matin du jour qui suit sa redétection.



**Figure 11:** Nombre de jours d'intervalle entre la dernière détection et la recapture chez anguilles détectées recapturées (en fréquence relative cumulée) dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé au cours de la saison de migration 2013-2014. NE, nouvelle échelle; AE, ancienne échelle; NE-2013 n = 7 ; AE-2013 n = 10 ; NE-2014 n = 0 ; AE-2014 n = 4 ; Absence de pièges dans la nouvelle échelle en 2014.

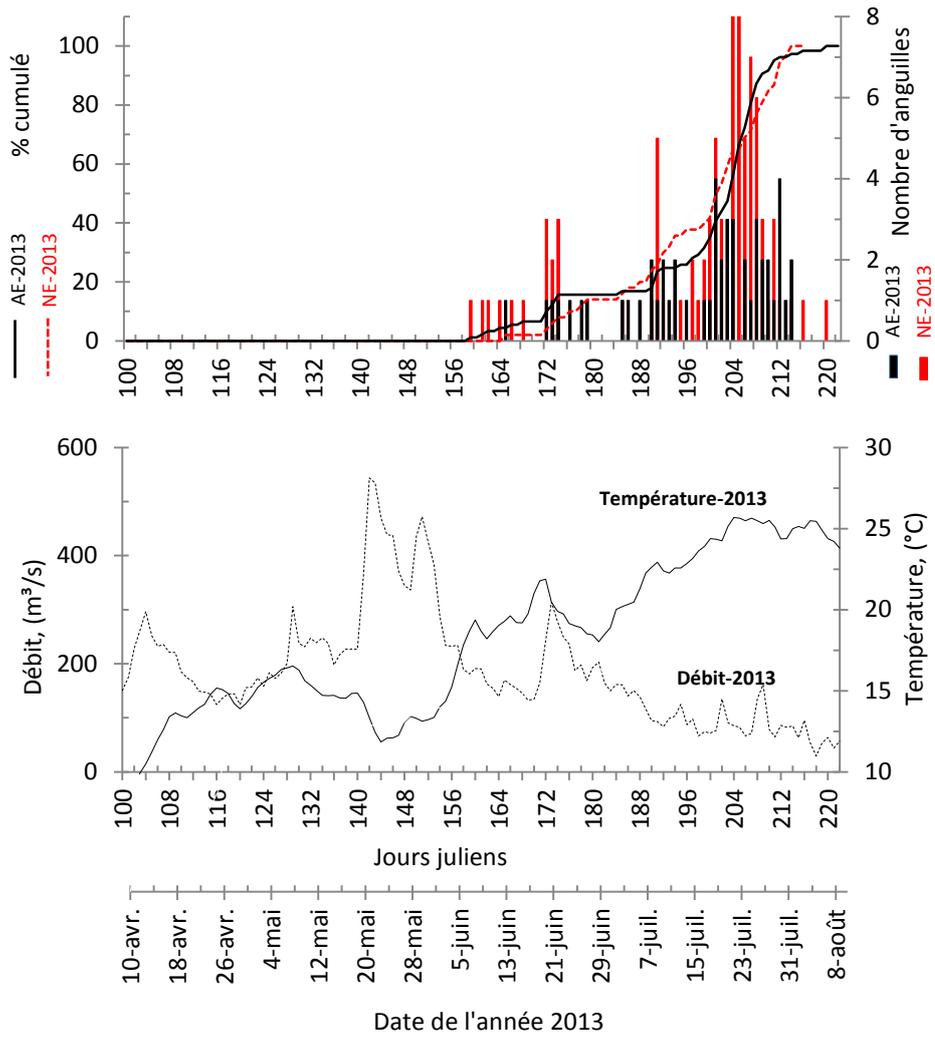
**Tableau 8: Relation entre la détection des anguilles et leur recapture en saison 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle. Lt, longueur totale ; P, poids ; s, seconde ; min, minute ; h, heure ; Δ, variation. Absence de piège dans la nouvelle échelle en 2014 ; \* individu repart de l'amont le 21/06/2013.**

Échelle de détection et recapture	Détection						Recapture			Δ jours entre la dernière détection et la recapture
	Anguille	Date	Heure	Nombre	Δ temps entre détections	Position finale	Date	Lt (mm)	P, (g)	
<b>NE-2014</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>AE-2014</b>	AD1C9C5	28/05/2014	01:33:19	8	4min	Aval	30/05/2014	432	126	2
	AD1C9A2	14/06/2014	01:53:08	2	1s	Aval	18/06/2014	441	120	4
	AD1C9B9	31/05/2014	02:39:59	9	20s	Amont				
		11/06/2014	21:40:50	1		Amont				
		16/06/2014	00:20:44	5	2s	Amont				
		17/06/2014	22:45:12	3	1min7s	Amont	20/06/2014	334	51	3
	AD1D74B	28/06/2014	00:13:58	3	1s	Amont	30/06/2014	352	55	2
<b>NE-2013</b>	AAEA0A9	18/07/2013	02:03:27	1		Amont	25/07/2013	687	439	7
	ACB42FA*	11/06/2013	03:07:01	2	13min	Aval				
		21/06/2013	03:24:17	11	26min	Amont	21/06/2013	505	184	<1
		22/06/2013	00:02:42	5	58min	Aval				
		21/07/2013	23:14:18	7	24s	Aval				
		22/07/2013	22:41:00	17	5h	Aval				
		23/07/2013	21:45:41	11	3h18min	Aval				
		24/07/2013	22:13:44	4	6h	Amont	25/07/2013	505	184	1
	ACB42F7	10/06/2013	04:07:54	3	24s	Amont				
		11/06/2013	02:03:29	2	13s	Aval				
		20/06/2013	02:41:53	3	30min	Amont	21/06/2013	579	269	1
	AAEA04F	7/07/2013	04:52:29	1		Amont	8/07/2013	514	185	1
	AAEA09E	5/07/2013	02:43:02	4	24min	Aval	8/07/2013	424	109	3
	AD1D6F5	12/07/2013	23:36:06	4	4s	Aval	15/07/2013	420	98	3
<b>AE-2013</b>	AAE9EC9	17/06/2013	2	6	7s	Aval	9/07/2012	311	36	22
	AD1D724	30/07/2013	06:13:42	1		Amont	1/08/2013	444	150	2
	AD1C9B5	27/07/2013	22:55:26	8	8s	Aval				
		28/07/2013	22:50:14	6	11s	Aval				
		30/07/2013	01:24:55	1		Amont				
		31/07/2013	00:08:54	3	49s	Amont	1/08/2013	339	47	1
	AD1C99C	30/07/2013	04:37:27	3	3s	Amont				
		31/07/2013	01:18:04	13	3h12	Amont	5/08/2013	321	44	5
	AAEA045	22/06/2013	23:47:16	2	1s	Aval	25/07/2013	532	152	33
	AAEA07B	24/07/2013	04:47:29	3	1s	Amont	25/07/2013	472	146	1
	AD1D709	23/07/2013	02:56:22	8	24min	Aval	25/07/2013	307	42	2
	AAEA098	21/07/2013	02:07:24	2	2h	Aval				
		22/07/2013	00:24:41	5	8s	Amont	22/07/2013	429	97	<1
	AAEA063	10/07/2013	03:25:35	5	11h	Amont	11/07/2013	395	87	1
	AAEA034	10/07/2013	05:06:38	5	4min	Amont	11/07/2013	392	109	1

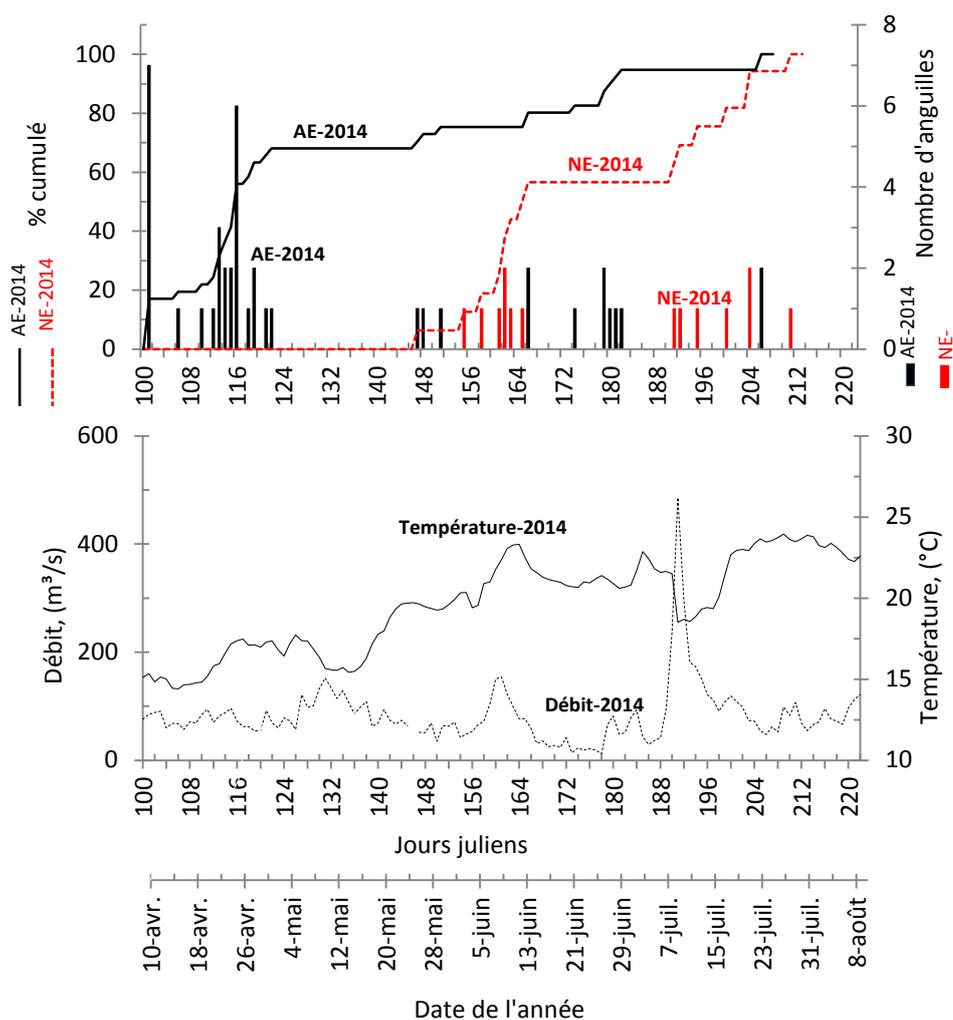
#### **2.1.3.2.3.2. Période de migration**

La période de migration des anguilles détectées montre une différence entre les deux saisons de migration de remontée des anguilles dans les échelles (fig. 12 & 13). La saison de migration 2013 (durée maximale = 62 jours) apparaît plus courte que la saison 2014 (durée max. = 111 jours). Certes, le refroidissement de la Meuse observé entre le 9 mai 2013 (température de l'eau 16.5°C) et le 24 mai 2013 (11.8°C) aurait probablement retardé le déclenchement du processus de migration et expliquerait la durée très courte de la saison 2013. La longue durée de la saison 2014 proviendrait des températures très clémentes de l'hiver 2013 – 2014 (minimum – maximum : 6°C observé le 30/1/2014 – 12.4°C le 21/3/2014) qui auraient créé tôt pendant l'année les conditions des températures favorables à l'activité migratoire des anguilles.

Entre les deux échelles à poissons, la période de migration semble être très rapprochée au cours de la saison 2013. En revanche, dans la saison 2014, la migration est précoce et plus étalée dans l'ancienne échelle que dans la nouvelle échelle. Cette observation semble consolider l'hypothèse selon laquelle l'ancienne échelle serait une route préférée, de premier choix des anguilles au cours de leur montaison.



**Figure 12:** Période de migration (en nombre et en fréquence relative cumulée) des anguilles détectées dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé au cours de la saison de migration 2013. NE, nouvelle échelle; AE, ancienne échelle; NE-2013 n = 51 ; AE-2013 n = 88.

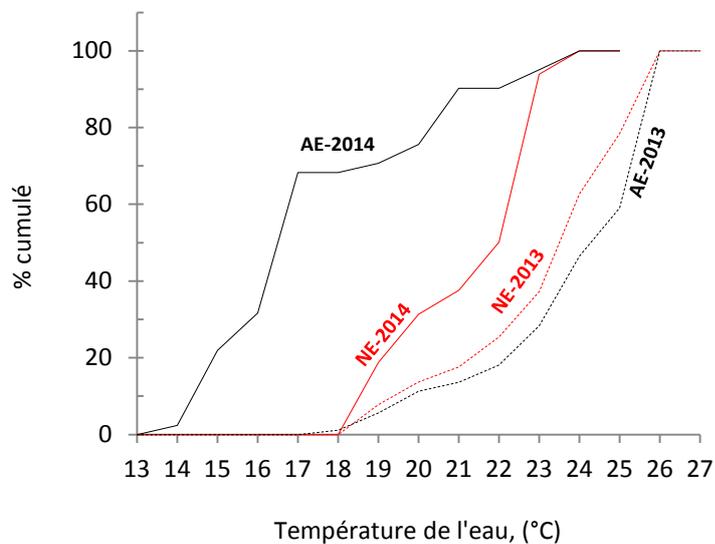


**Figure 13:** Période de migration (en nombre et en fréquence relative cumulée) des anguilles détectées dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé au cours de la saison de migration 2014. NE, nouvelle échelle; AE, ancienne échelle; NE-2014 n = 16 ; AE-2014 n = 41.

### 2.1.3.2.3.3. Température et débit

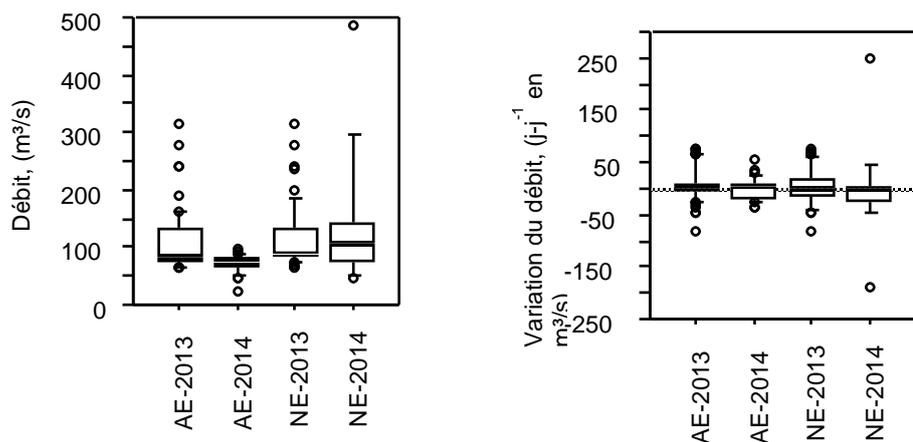
Les anguilles détectées migrent dans les échelles à poissons à une température comprise entre 14 et 26°C (fig. 14). Dans la nouvelle échelle, d'importantes activités migratoires sont enregistrées entre 22 et 24°C indépendamment des saisons de migration. Dans l'ancienne échelle, l'activité des anguilles culmine à des températures plus basses entre 16 et 17°C au cours de la saison de migration 2014 par rapport aux valeurs de températures comprises entre 25 et 26°C observées pendant la saison 2013. Ce grand écart des températures entre les saisons observé dans l'ancienne échelle s'expliquerait par l'hiver très doux connu en 2013 – 2014 qui aurait hâtivement déclenché la migration des anguilles au cours de la saison 2014. De même, l'écart thermique marqué en 2014 entre l'ancienne échelle et la nouvelle échelle est imputable à la migration décalée entre les 2 échelles. En

effet, cette migration apparaît plus précoce dans l'ancienne échelle que dans la nouvelle échelle.



**Figure 14:** Fréquence relative cumulée (en %) d'anguilles détectées dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé par les anguilles en fonction de la température de l'eau en saisons de migration 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle; AE, ancienne échelle; NE-2013 n = 51 ; AE-2013 n = 88 ; NE-2014 n = 16 ; AE-2014 n = 41.

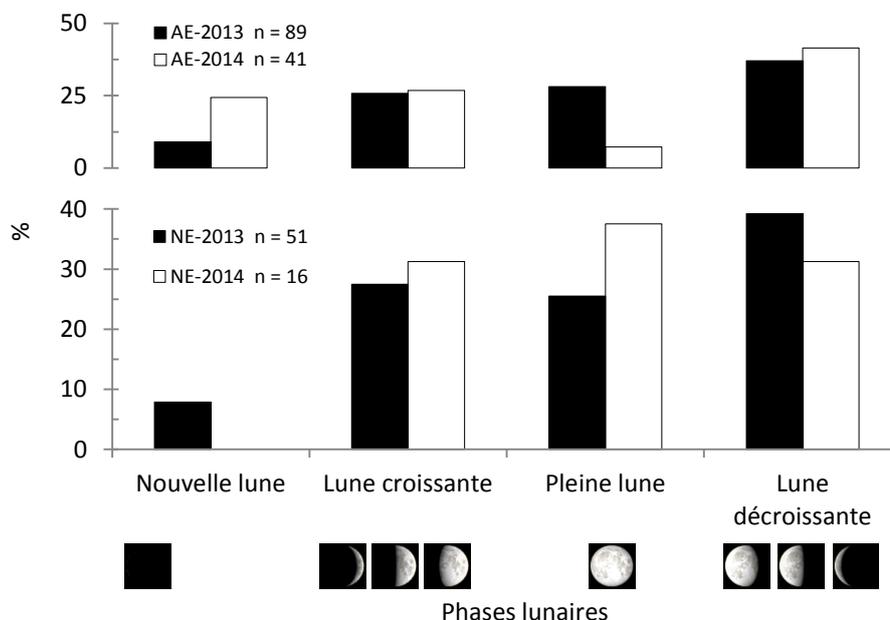
Les saisons de migration des anguilles à travers les échelles à poissons coïncident avec la période de l'année au cours de laquelle le débit de la Meuse est au bas niveau. Au cours des saisons de migration 2013 – 2014, le débit de la Meuse observé le jour de la détection et la variation du débit entre le débit du jour de la détection et le débit du jour précédant la détection n'affectent pas significativement (test de Kruskal-Wallis,  $p > 0.05$ ) la remontée des anguilles dans les échelles à poissons (fig. 15). L'indépendance relative de la détection des anguilles migrantes en termes des débits de la Meuse et des variations des débits est soutenue par des basses valeurs des débits (saison 2013 : médiane, 85 m<sup>3</sup>/s ; 90%, 66–170 m<sup>3</sup>/s et saison 2014 : médiane, 77 m<sup>3</sup>/s ; 90%, 50–119 m<sup>3</sup>/s) et des variations des débits (saison 2013 : médiane, -3 m<sup>3</sup>/s ; 90%, -35 à +63 m<sup>3</sup>/s et saison 2014 : médiane, 2.4 m<sup>3</sup>/s ; 90%, -24 à +24 m<sup>3</sup>/s) observées. De même, aucun lien significatif (Spearman Rank Correlation -  $r_s$ ,  $p > 0.05$ ) n'a été décelé entre la taille des anguilles détectées d'une part et d'autre part le débit de la Meuse ( $r_s = 0.11$ ) et entre la taille des anguilles et la variation du débit de la Meuse ( $r_s = 0.02$ ).



**Figure 15** : Distribution des anguilles marquées en 2013 et détectées au cours des saisons de migration 2013 – 2014 dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé en fonction du débit de la Meuse à la détection de l’anguille et de la variation du débit de la Meuse entre le débit du jour de la détection et le débit du jour avant la détection. NE, nouvelle échelle; AE, ancienne échelle ; NE-2013 n = 50 ; AE-2013 n = 81 ; NE-2014 n = 15 ; AE-2014 n = 41 ; p <0.05, test de Kruskal-Wallis.

#### 2.1.3.2.3.4. Phase lunaire

La répartition des anguilles marquées détectées en fonction de la phase lunaire montre que les anguilles migrent pendant toutes les phases lunaires indépendamment de l’échelle et de la saison de migration (fig. 16). Toutefois, une proportion significativement plus élevée d’anguilles (test de probabilité exacte de Fisher, p <0.01) migre pendant les phases croissante et décroissante de la lune (saison 2013 : 64.8% des anguilles détectées et ; saison 2014 : 65.4%).

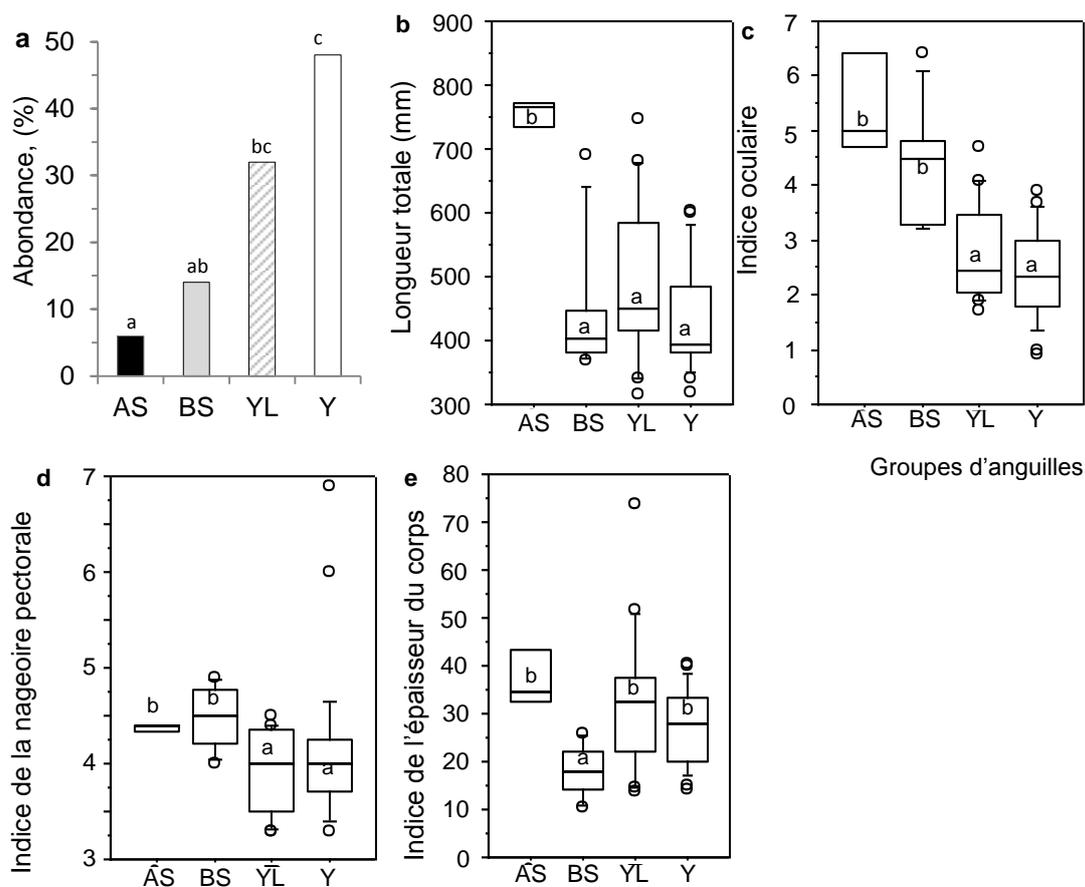


**Figure 16**: Répartition des anguilles marquées détectées (en %) en fonction de la phase lunaire lors de la première détection dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé en saisons de migration 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle ; NE-2013 n = 51; AE-2013 n = 88; NE-2014 n = 16; AE-2014 n = 41 ; \* p <0.05, test de Khi-deux.

#### **2.1.3.2.4. Paramètres morphologiques**

##### **2.1.3.2.4.1. Caractères anatomiques externes**

L'analyse des caractères anatomiques externes de la population migrante des anguilles à Lixhe montre que la majorité de ces anguilles en remontée dans les échelles à poissons sont jaunes (test de probabilité exacte de Fisher,  $p < 0.05$ ) (fig. 17). Ce groupe réunit les anguilles typiquement jaunes et les anguilles jaunes présentant un début de formation de la ligne latérale. Ces anguilles jaunes présentent des descripteurs morphométriques comme la taille corporelle, l'indice oculaire et l'indice de la nageoire pectorale qui sont significativement inférieurs (test de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney,  $p < 0.05$ ) à ceux d'un autre groupe d'anguilles très minoritaire constitué des anguilles montrant un processus d'argenture continentale avancé. Ce groupe minoritaire se différencie d'autres groupes par une teinte argentée sur le ventre et noire sur le dos, caractéristique des poissons marins, une plus grande taille corporelle et une dilatation de façon considérable des organes sensoriels (augmentation de la surface oculaire, dilatation des narines, allongement des nageoires pectorales, ligne latérale bien distincte). Entre ces deux écophases, il y a des anguilles qui ne sont ni jaunes, ni tout à fait argentées, probablement en phase de transition entre anguilles jaunes et anguilles argentées. Cette diversité morphologique dans la fraction migrante des anguilles illustrée sur la figure 18 soulève de sérieuses questions sur leur sexe, leur état de maturation, leur âge et leur statut de sédentaire dans la Meuse ou de migrateur en provenance de la mer.



**Figure 17** : Caractéristiques morphologiques de la population migrante d'anguilles à Lixhe, en 2013. Y, anguilles jaunes ( $n = 24$ ) ; YL, anguilles jaunes avec le début de formation de la ligne latérale ( $n = 16$ ); BS, anguilles au début du processus d'argenture ( $n = 7$ ) et ; AS, anguilles montrant un processus d'argenture continentale avancé ( $n = 3$ ).  $p < 0.05$ , tests de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney pour la taille et les indices corporels et, test de probabilité exact de Fisher pour l'abondance relative des groupes.



**Figure 18:** L'anguille de taille maximum capturée en 2013 et sa surface oculaire et illustration de la variabilité morphologique des anguilles migrantes à Lixhe.

#### 2.1.3.2.4.2. Croissance

Le gain de taille chez les anguilles détectées recapturées dans les échelles à poissons du barrage de Lixhe au cours des saisons de migration 2013 – 2014 (tableau 9) est estimé entre 1.4 et 3.6 cm annuellement (n = 6). Le poids quant à lui s'accroît entre 1 et 34 g par année.

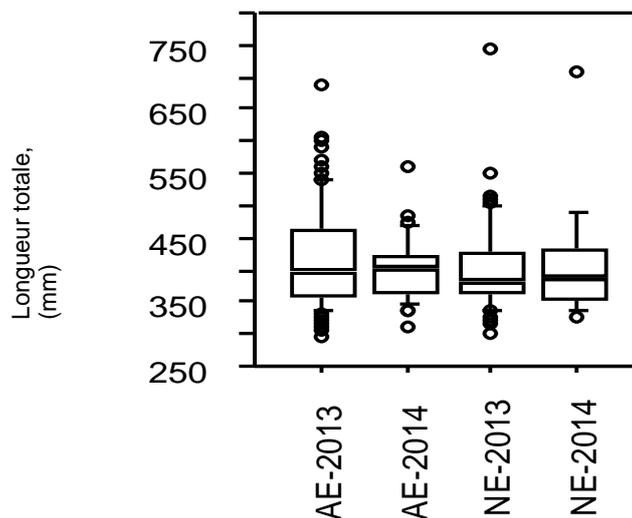
Les valeurs minimales de croissance (1.4 – 1.6 cm/an) sont obtenues chez les anguilles recapturées dans l'année qui suit l'année de leur marquage.

**Tableau 9:** Croissance annuelle de quelques anguilles détectées recapturées, en 2013 – 2014. NE, nouvelle échelle ; AE, ancienne échelle.

Anguille	Capture				Détection		Recapture				Croissance annuelle	
	Date	Échelle	Lt, (mm)	P, (g)	Date	Échelle	Date	Échelle	Lt, (mm)	P, (g)	Lt, (mm)	P, (g)
AAE9EC9	9/07/2012	NE	505	187	17/06/2013	AE	17/06/2013	AE	526	191	21	4
A138	28/06/2010	AE	367	64	25/07/2013	AE	25/07/2013	AE	475	163	36	33
AD1D74B	25/07/2013	AE	336	54	28/06/2014	AE	30/06/2014	AE	352	55	16	1
AD1C9B9	25/07/2013	AE	312	43	31/05/2014	AE	20/06/2014	AE	334	51	22	8
AD1C9A2	29/07/2013	NE	415	96	14/06/2014	AE	18/06/2014	AE	441	120	26	24
AD1C9C5	25/07/2013	AE	418	92	28/05/2014	AE	30/05/2014	AE	432	126	14	34

### 2.1.3.1.4.3. Détection et taille corporelle des anguilles

Au cours des saisons de migration 2013 – 2014, la taille corporelle des anguilles au moment du marquage n'influence pas significativement l'utilisation des échelles à poissons du barrage de Lixhe (KW-test,  $p > 0.05$ ) (fig. 19). Ceci permet de formuler l'hypothèse selon laquelle, l'ancienne échelle comme la nouvelle échelle seraient des routes de migration non sélectives à l'égard de la taille des anguilles capturées à Lixhe.



**Figure 19:** Distribution des anguilles marquées en 2013 et détectées au cours des saisons de migration 2013 – 2014 dans les deux échelles à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse à Visé en fonction de la taille corporelle au marquage de l'anguille. NE, nouvelle échelle; AE, ancienne échelle ; NE-2013 n = 50 ; AE-2013 n = 81 ; NE-2014 n = 15 ; AE-2014 n = 41.  $p < 0.05$ , test de Kruskal-Wallis.

#### 2.1.4. Discussion

Au cours de cette étude, nous avons effectué une estimation de la population migrante d'anguilles en remontée dans la Meuse en Wallonie à partir de la mer du Nord via les Pays-Bas grâce à l'utilisation des échelles à poissons installées au barrage de Lixhe.

Pour l'évaluation des stocks, la méthode de capture – marquage – recapture (CMR) utilisée estime la population en aval des échelles de Lixhe en 2013 à 6 152 anguilles (0.738 t). Mais, cette estimation ne tient pas compte de la fraction d'anguilles migrantes en remontée en Meuse par le canal Albert via les écluses de Lanaye situées en aval de Lixhe, laquelle s'avère indispensable d'être évaluée dans le futur. Sur la base de l'estimation réalisée, il ressort que la contribution potentielle des populations migrantes d'anguilles à Lixhe au stock des géniteurs panmictiques serait très faible. Elle représenterait la moitié du nombre estimé d'anguilles d'après la méthode CMR et près de trois cinquième de la biomasse. Cette méthode révèle également que le stock de la population d'anguille dans la Meuse est actuellement à son niveau le plus bas comparé à son niveau de 1993 (445 000 anguilles, 16.5 t) estimé plus amont à Ampsin (Baras et al. 1996) par CMR. Cette constatation concorde avec l'état actuel de déclin du stock observé dans toute l'aire de distribution géographique de l'espèce (ICES 2013). Le barrage de Lixhe est le 8<sup>ème</sup> obstacle à la remontée des poissons dans la Meuse depuis la mer du Nord. Sur tout le linéaire entre l'embouchure et Lixhe, la situation s'est nettement améliorée en terme de libre circulation piscicole (dans le sens de la montaison) puisque des passes migratoires modernes ont été aménagées depuis l'embouchure de la Meuse. D'autre part, la qualité physico-chimique de la Meuse est aussi en amélioration. Les probables causes du déclin sont donc à chercher ailleurs mais restent difficilement hiérarchisables.

Concernant la structure démographique de la population migrante, l'étude montre que les anguilles qui arrivent à Lixhe, appartiennent à différents stades de développement de l'anguille. Ces anguilles pourraient provenir de cohortes et de milieux distincts. Des études plus approfondies sont indispensables pour connaître davantage les variations des structures par sexes, état de maturation, âge et statut (sédentaire dans la Meuse ou nomade en provenance de la mer) lors des captures des anguilles à Lixhe.

La méthode CMR montre qu'un taux de 8.3% des anguilles situées en aval du barrage remonte vers l'amont via dans les deux échelles à poissons de Lixhe. Nous observons également un taux d'utilisation non différent entre l'ancienne échelle et la nouvelle échelle de Lixhe par les anguilles en montaison. En revanche, les résultats de détection révèlent que l'ancienne échelle qui opère à faible débit serait une voie de migration de remontée de premier choix des anguilles par rapport à la nouvelle échelle. Cette contradiction par rapport à la méthode CMR s'expliquerait par le fait que certaines anguilles non retenues dans le bassin-piège de l'ancienne échelle font demi-tour vers l'aval après avoir buté devant les obstacles constitués par le cône et la grille du bassin-piège et quittent cette échelle pour ensuite remonter via la nouvelle échelle. Opérant à débit plus élevé, la nouvelle échelle est située sur la rive droite de la Meuse et ne possède aucune grille qui peut empêcher les anguilles de progresser vers l'amont. Cette indication de voie prioritaire de l'ancienne échelle pour la montaison des anguilles démontre la nécessité de prendre soin de cette échelle comme un outil d'échantillonnage et de surveillance de recrutement des populations

d'anguilles en Meuse. Cependant, la capture, la recapture et la détection des anguilles dans la nouvelle échelle révèlent que les anguilles sont capables de remonter la Meuse via des passes migratoires modernes aménagées pour des poissons migrateurs à grande capacité de nage comme le saumon atlantique et la truite de mer. Il serait intéressant d'exploiter le comportement cryptique des anguilles par installation d'abris-pièges amovibles dans la cage-piège de la nouvelle échelle pour faire contribuer cette échelle à la prise des données de remontée des anguilles à Lixhe.

Notre étude montre aussi que le transit des anguilles dans les deux passes à poissons est nocturne essentiellement entre 22h00 et 4h00. Ce transit ne s'opère pas en un passage direct puisque certaines anguilles résident quelques jours dans les échelles avant de continuer leur colonisation vers l'amont. De même, le rôle des résidences temporaires pour les anguilles migrantes joué par les deux échelles devrait être pris en compte lors des travaux d'entretien (éviter de supprimer tous les abris potentiels des anguilles) et des travaux de maintenance (installer des substrats appropriés favorisant l'enfouissement comme des blocs de pierres) des échelles, pour améliorer le confort des anguilles lors de leur transit.

En outre, la relation entre la détection et la recapture révèle que beaucoup d'anguilles détectées ne sont pas capturées. Ceci amène à réfléchir sur la manière d'accroître la capacité du bassin-piège de l'ancienne échelle à mieux retenir les anguilles piégées. En agissant par exemple sur le fonctionnement du cône installé à l'entrée du piège, lequel devrait empêcher les anguilles de faire demi-tour et de regagner les bassins situés en aval du piège d'une part et d'autre part, en installant une grille étanche à l'amont du bassin-piège pour éviter les anguilles de sortir vers la Meuse via les espaces entre les parois du bassin piège et la grille. La fidélité à l'égard des routes de migration observée chez les anguilles migrantes est un comportement déjà reporté auprès des anguilles jaunes vis-à-vis de leurs lieux de résidence pendant la phase de sédentarisation (Baras et al. 1998 ; Jellyman et al. 2003 ; Ovidio et al. 2013). Ce comportement devrait être une aide précieuse dans la mise en œuvre de systèmes efficaces de piégeage avec fines mailles retenant des anguilles pour améliorer dans le temps les résultats des études des recaptures des anguilles dont les routes de migration sont préalablement connues.

Pour les deux années considérées, à partir d'une seule année de marquage, l'étude de détection RFID montre que la dynamique de migration diffère fortement entre individus dans la population migrante d'anguilles capturées à Lixhe. Certaines anguilles continuent à migrer après le marquage et sont détectées dans l'année de leur relâcher. D'autres anguilles ne sont détectées qu'à partir de l'année qui suit l'année de leur relâcher.

Ces résultats montrent qu'il est possible de quantifier le flux migratoire d'une espèce de poisson à instinct cryptique comme l'anguille dans un milieu très ouvert, un grand fleuve comme la Meuse et ; d'acquérir des informations importantes sur le comportement de la population migrante d'anguilles et leur utilisation des ouvrages de franchissement d'obstacles à l'entrée de la Wallonie. Ces informations aideront dans les années à venir, à appliquer des bonnes politiques de gestion des stocks en vue de la conservation de l'espèce et de la réalisation de l'objectif fixé par l'Europe. Si cette expérience devait se poursuivre, il serait pertinent de prendre en considération les éléments suivants : (a) un contrôle

quotidien des pièges ou une amélioration du piège amont de l'ancienne échelle pour éviter des sorties ou des demi-tours des anguilles; (b) une période d'étude de détection CIPAM-RFID avec des conditions uniformisées de libre circulation des anguilles rétablies dans les deux passes à poissons ; (c) installation de deux antennes de détection pour chaque échelle à poissons, une antenne à l'entrée de l'échelle et une autre antenne vers la sortie de l'échelle; (d) prévoir deux points de relâcher des anguilles marquées, un point sur la rive droite de la Meuse et un autre point sur la rive gauche.

**ACTION 2. PIEGEAGE DANS LES ECHELLES A POISSONS, MARQUAGE ET SUIVI DES  
MIGRATIONS, SUIVI DES REPEUPEMENTS**

**2.2. SUIVI DES MIGRATIONS DANS LES AXES FLIVIAUX MEUSE ET OURTHE**

### 2.2.1. Introduction

L'anguille européenne *Anguilla anguilla* est l'une des espèces qui colonise tous les types d'habitats accessibles depuis la mer (Tesch 2003 ; Baisez & Lafaille 2005). La colonisation des milieux continentaux par l'anguille tel que l'exige son cycle biologique s'effectue selon un phénomène de densité-dépendance (Ibbotson et al. 2002 ; Feunteun et al. 2003). Mais, l'accessibilité à de tels habitats depuis les parties aval des fleuves jusqu'aux ruisseaux de tête des bassins hydrographiques n'est pas toujours aisée à cause de la fragmentation des cours d'eau avec des obstacles physiques. Comme illustrée sur la figure ci-dessous, la situation s'est améliorée dans la Meuse en terme de libre circulation piscicole (dans le sens de la montaison) depuis l'embouchure du fleuve jusqu'à Ivoz-Ramet à cause de la présence des passes migratoires modernes. Ces passes permettent théoriquement aux anguilles d'accéder aux habitats situés dans les secteurs amont (fig. 1).



**Figure 1:** Carte de localisation des passes à poissons pour le rétablissement de la libre circulation des poissons à la remontée dans la Meuse (Ministère de la Région Wallonne 2006)

En effet, l'anguille possède un comportement migratoire caractérisé par une capacité de nage dans les écoulements à faible vitesse et une capacité de reptation sur les surfaces mouillées et rugueuses au cours de laquelle la totalité du corps serpentiforme du poisson est sollicitée (Legault 1988). L'étude de l'histoire de vie chez cette espèce de poisson renseigne que certaines anguilles effectuent l'intégralité de leur croissance en mer, en estuaire, en eau douce (Jessop et al. 2004). D'autres anguilles par contre, changent de milieu une ou plusieurs fois au cours de leur vie (Daverat et al. 2005). Dans ce dernier groupe d'anguilles, la verticalité des parois de certains ouvrages et le lissage de certaines surfaces d'écoulement et d'appui peuvent rapidement rendre certains ouvrages infranchissables par les poissons et donc, devenir des facteurs limitant au changement des milieux de vie et à la colonisation des habitats continentaux.

Comparé aux poissons qui remontent les cours d'eau pour se reproduire, l'anguille colonise les rivières à une faible vitesse. Plus la distance à la mer est importante, plus les anguilles migrantes sont grandes. Le comportement migrateur chez cette espèce peut s'exprimer jusqu'à un stade de croissance avancé (Lobón-Cerviá et al. 1995 ; White & Knights 1997). En fait, l'anguille alterne des périodes de migration et d'alimentation lors de la colonisation des cours d'eau. Selon Owen (2001), la séparation des phases de croissance et de migration est indispensable chez cette espèce à cause du coût énergétique de la digestion s'opposant à l'expression de l'activité locomotrice.

Plusieurs auteurs ont mis en évidence les variations des structures démographiques des anguilles de l'aval à l'amont dans des systèmes fluviaux (Naismith & Knights 1997 ; Ibbotson et al. 2002 ; Feunteun et al. 2003) et les variations de vitesse de nage en fonction du stade de développement (Tesch 2003 ; Clough et al. 2004 ; Quintella et al. 2010 ; Delcourt et al. 2011). En revanche, la dynamique de migration et l'intensité du flux migratoire des anguilles qui franchissent la limite de marée dynamique et progressent vers les secteurs fluviaux plus amont (en devenant des anguilles jaunes) ont été peu étudiées jusqu'à présent. La raison plus probable serait qu'il est plus facile d'étudier l'anguille dans ses phases fortement migratoires (civelles, anguilles argentées) que sa phase de sédentarisation ou de croissance (anguilles jaunes). Pourtant, au stade d'anguilles jaunes, certains individus continuent de migrer et de progresser en direction des secteurs amont des cours d'eau (Lobón-Cerviá et al. 1995 ; White & Knights 1997) en franchissant certains obstacles physiques. Mais, l'anguille possède des capacités de nage inférieures à celles d'autres espèces migratrices. En conséquence, beaucoup de passes à poissons conçues pour les salmonidés afin contourner les obstacles physiques des cours d'eau sont moins adéquates pour les anguilles en raison de vitesses de courants trop élevées. Dans ce contexte et en l'état actuel du déclin populationnel, il s'avère urgent de comprendre la dynamique de migration des anguilles jaunes lors de leurs colonisations des habitats de croissance situés en amont des cours d'eau. Cette connaissance fournirait des indications précieuses sur le niveau de recrutement fluvial et l'état actuel de la libre circulation des anguilles sur les réseaux hydrographiques étudiés. Ces deux éléments sont indispensables dans la prise des mesures adéquates de conservation de l'espèce.

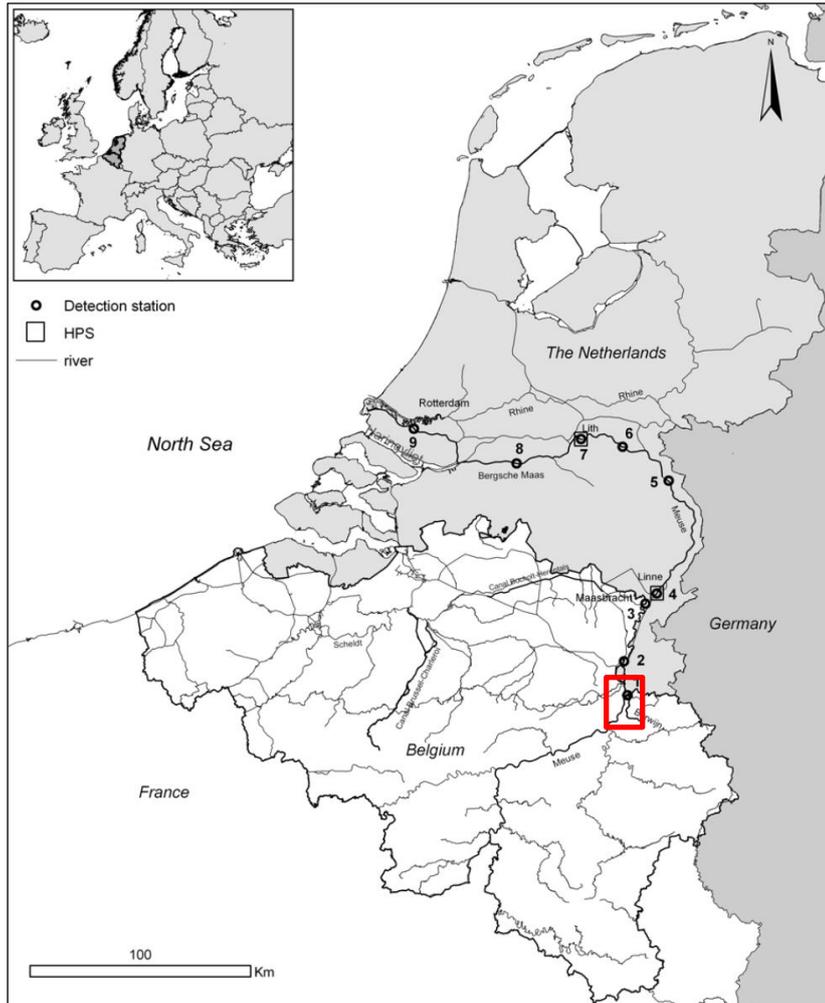
Cette étude réalisée sur des secteurs fluviaux fragmentés par des obstacles physiques mais équipés des passes migratoires et très loin de la zone tidale de la Meuse, a pour objectifs de:

- préciser la dynamique de migration des populations d'anguilles jaunes recrutées naturellement par migration de remontée dans la Meuse en Wallonie en Belgique;
- évaluer le flux migratoire de ces anguilles jaunes sur deux axes fluviaux principaux : la Meuse et son principal affluent appelé l'Ourthe, dans le bassin hydrographique de la Meuse belge, grâce à l'utilisation d'un réseau des stations automatique de détection RFID installées dans des échelles à poissons des barrages hydroélectriques sur les deux axes fluviaux étudiés.

## **2.2.2. Matériel et méthode**

### **2.2.2.1. Site d'étude**

L'étude a été réalisée sur le cours belge du bassin de la Meuse qui comporte l'axe fluvial de la Meuse et l'axe fluvial de l'Ourthe. L'axe fluvial de la Meuse comprend le cours principal de la Meuse à partir du barrage de Lixhe à Visé (50°45'N, 5°40'E, 323 km amont de la Mer du Nord) près de la frontière avec les Pays-Bas jusqu'au barrage d'Yvoz-Ramet (50°35'N, 5°27'E, 31 km amont de Lixhe) (fig. 2, 3 & 4). L'axe fluvial de l'Ourthe inclut la partie aval de l'Ourthe depuis sa confluence avec la Meuse jusqu'au barrage d'Angleur (50°36'N, 5°36'E, 2.3 km amont de la confluence). L'Ourthe est le principal affluent de la Meuse et forme avec ses affluents un important habitat de près de 600 hectares d'eau libre disponible pour la résidence de l'anguille (Philippart et al. 2010).



**Figure 2:** Carte de localisation du site d'étude (rectangle rouge) sur la Meuse et l'Ourthe, en Belgique (carte reprise de Verbiest et al. 2007).

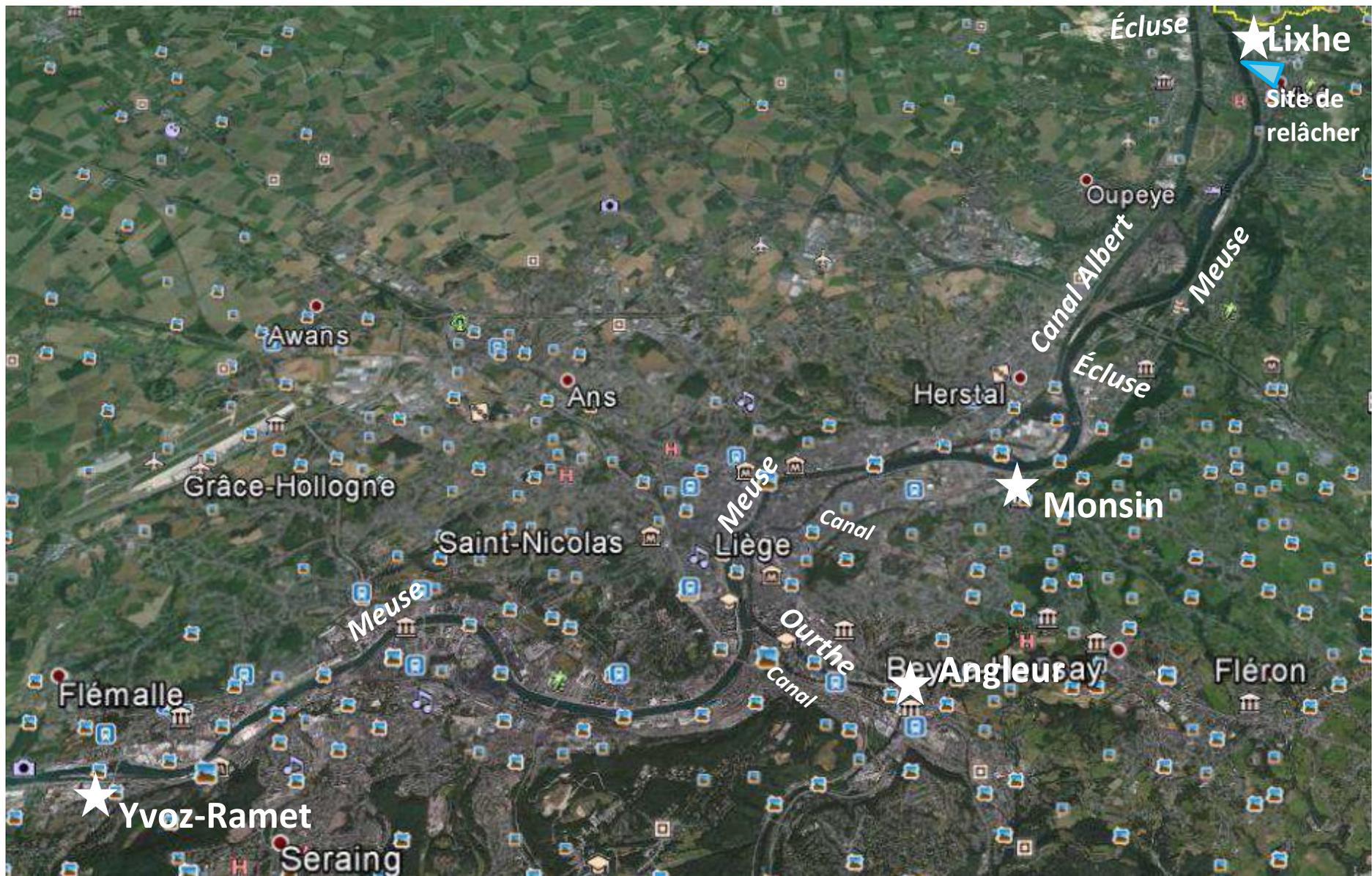


Figure 3 : Vues aériennes (Google Earth) des sites des barrages hydroélectriques équipés des échelles à poissons (étoile blanche), le site de relâcher des anguilles marquées (triangle bleu), le canal Albert, le cours principal de la Meuse et son canal de dérivation à Liège, l'Ourthe et son canal.

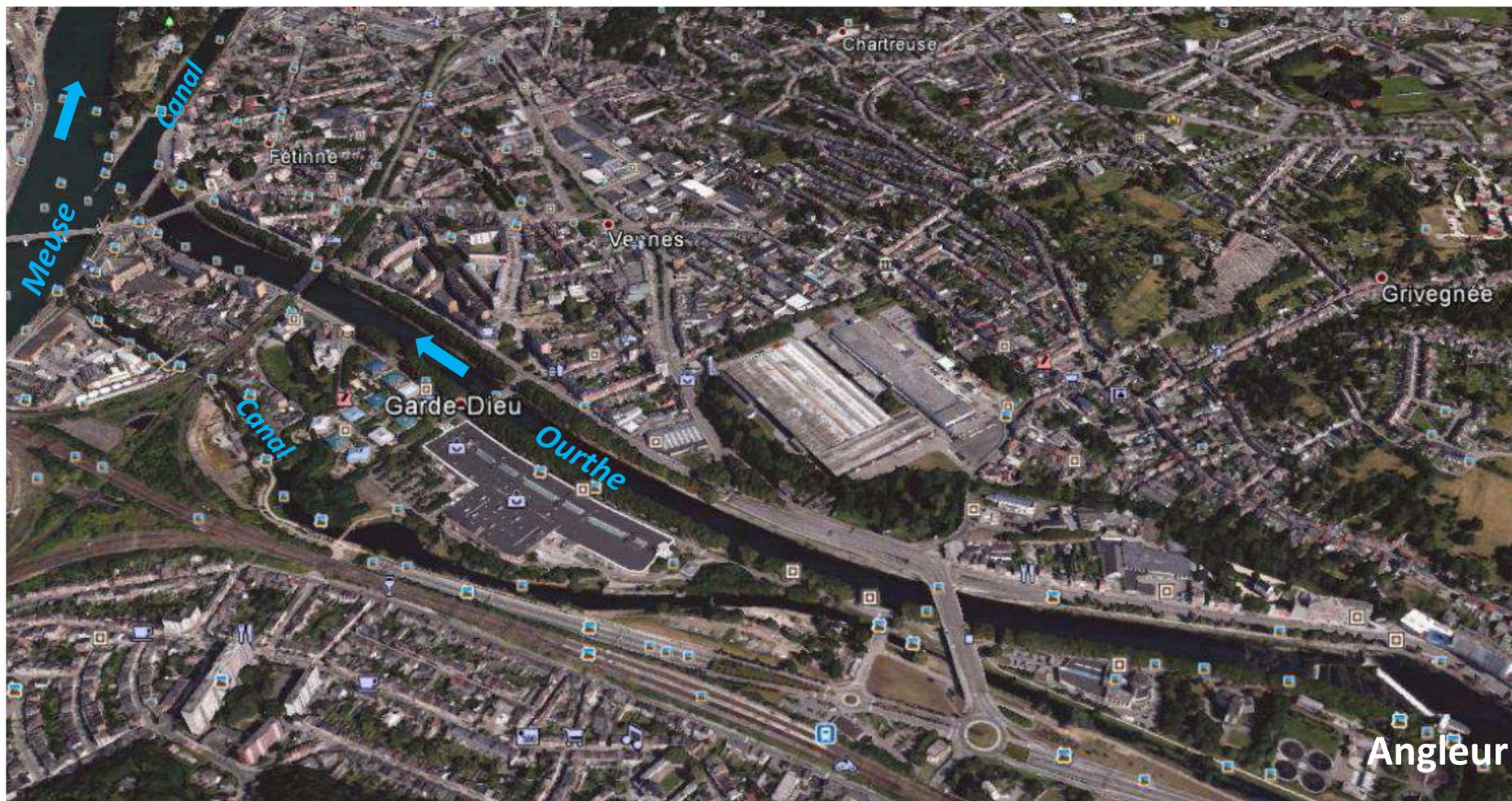


Figure 4: Vues aériennes (Google Earth) de la Basse Ourthe (l'Ourthe et son canal), de la confluence avec la Meuse au barrage d'Angleur.

Les axes fluviaux étudiés sont fragmentés par des barrages hydroélectriques équipés des échelles à poissons qui assurent la connectivité longitudinale des cours d'eau (fig.5 – 10). Toutes ces passes migratoires des poissons possèdent une configuration constituée des bassins successifs à fentes verticales. Les anguilles marquées ont été relâchées à 200 m amont du barrage de Lixhe pour poursuivre leur remontée vers les secteurs fluviaux situés en amont du barrage. Sur chaque axe migratoire étudié, ces anguilles doivent franchir deux échelles à poissons. Il s'agit de l'aval vers l'amont sur l'axe de la Meuse, de l'échelle à poissons du barrage de Monsin (13.21 km amont du site de relâcher, sur la Meuse) à l'échelle du barrage d'Yvoz-Ramet (30.71 km amont du site de relâcher). Sur l'axe fluvial de l'Ourthe, de l'aval vers l'amont, il y a l'échelle à poissons du barrage de Monsin sur la Meuse suivi de l'échelle à poissons du barrage d'Angleur (21.34 km amont du site de relâcher) sur l'Ourthe.

Les principales caractéristiques de trois échelles à poissons du site d'étude sont résumées dans le tableau 1. Le réseau fluvial étudié est constitué par deux cours d'eau (la Meuse et son principal affluent l'Ourthe), lesquels présentent des seuils thermiques différents, avec l'Ourthe comme la rivière plus froide.

**Tableau 1:** Principales caractéristiques de trois échelles à poissons et le régime thermique de l'eau, dans le réseau hydrographique étudié. Longueurs indiquées sont mesurées hors chenal d'amenée et chenal de fuite.

Caractéristiques	Monsin	Yvoz-Ramet	Angleur
<b>I. Configuration</b>			
Axe fluvial	Meuse	Meuse	Ourthe
Type	Bassins	Bassins	Bassins
Passage entre bassins	Fente verticale	Fente verticale	Fente verticale
Longueur, (m)	163	60	73
Débit, (m <sup>3</sup> /s)	0.78	0.78	0.5
Débit d'attrait, (m <sup>3</sup> /s)	1	1	1-1.5
Dénivellation, (m)	4.5	4.5	4.0
Dimension des bassins, (m)	2.0×1.5×0.6	2.0×1.5×0.6	3.5×2.4×1.6
Hauteur d'eau dans les bassins, (m)	0.5	0.5	1.2
Nombre des bassins	18	17	15
Largeur de la fente, (m)	0.35	0.35	0.30
Profondeur d'eau dans la fente, (m)	0.4	0.4	1.4
<b>II. Régime thermique journalier</b>			
<b>2010-2014, °C</b>			
Moyenne	13.9	15.2	11.2
Min - max	1.4-27.9	1.4-28.8	0.2-25.3
<b>Été 2010-2014 (juin, juillet &amp; Août)</b>			
Moyenne	21.7	22.8	17.9
Min - max	12.6-27.9	13.4-28.8	11.1-25.3
<b>Hiver 2013-2013 (déc. 2013 – fév. 2014)</b>			
Moyenne	7.3	8.3	5.9
Min - max	5.3-9.4	6.5-10.1	2.6-8.4



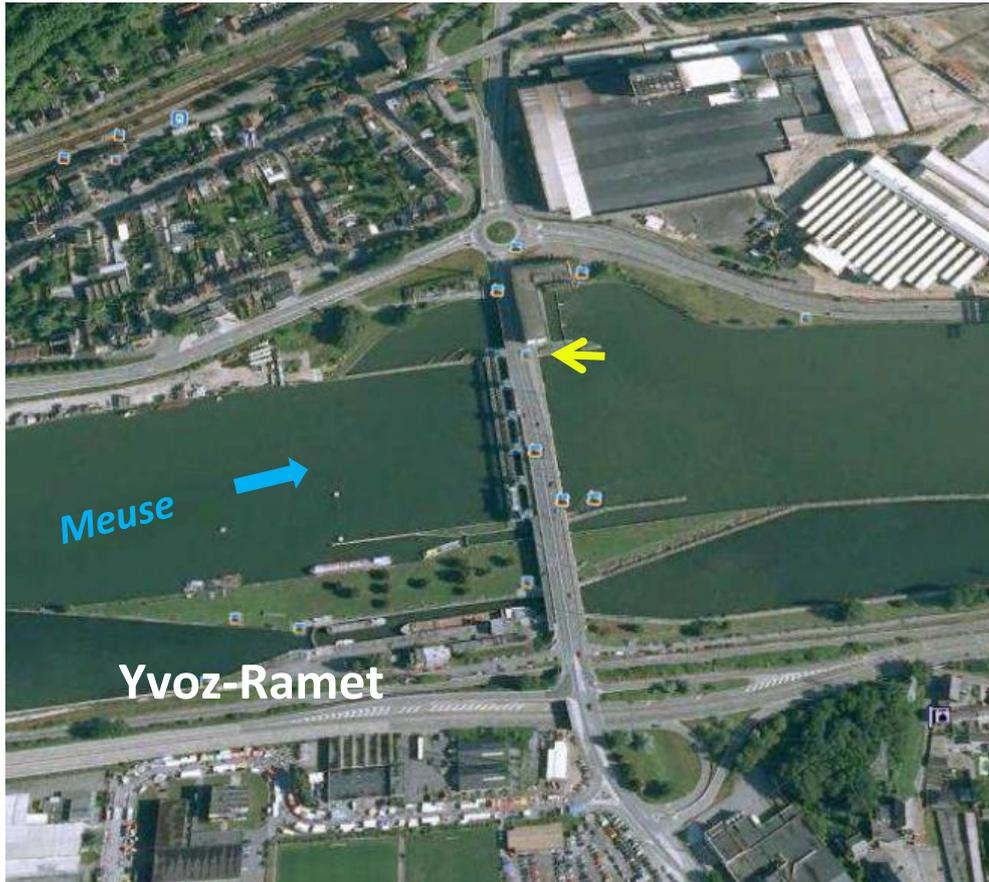
**Figure 5:** Vues aériennes (Google Earth) du site de barrage hydroélectriques de Lixhe sur l'axe fluvial de la Meuse, les entrées des échelles à poissons (flèche jaune) et le site de relâcher des anguilles marquées (triangle bleu).



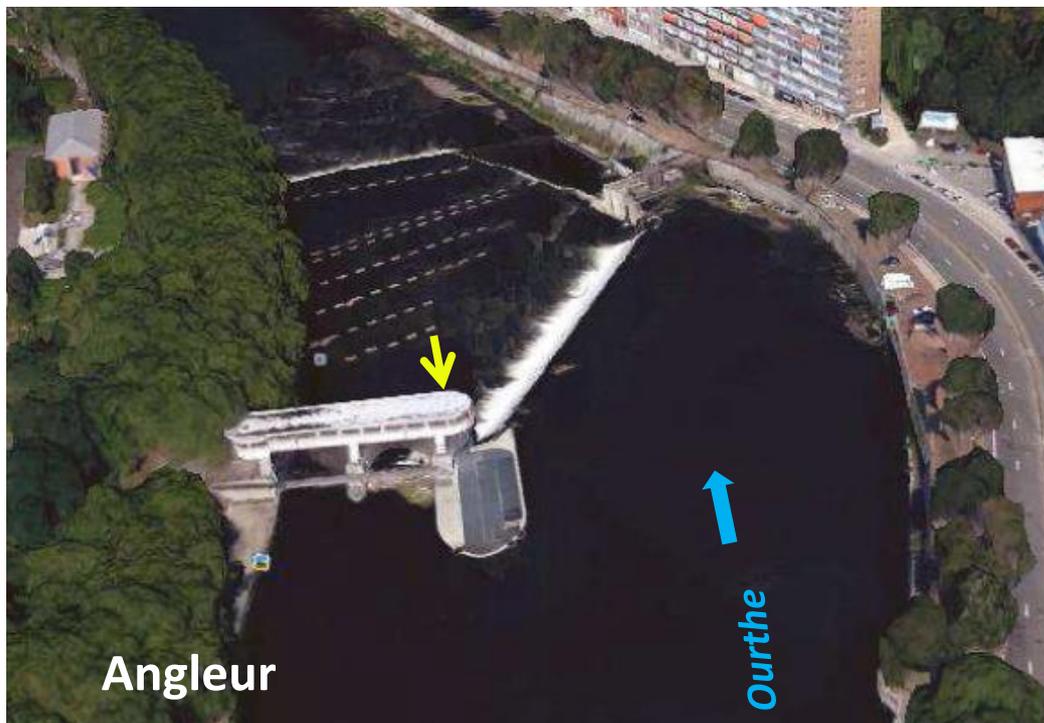
**Figure 6:** Vues aériennes (Google Earth) des sites des barrages hydroélectriques de Monsin sur l'axe fluvial de la Meuse et l'entrée de l'échelle à poissons (flèche jaune).



**Figure 7:** Vues de l'échelle à poissons du barrage de Monsin sur la Meuse belge (Philippart et al. 2010)



**Figure 8:** Vues aériennes (Google Earth) des sites des barrages hydroélectriques d'Yvoz-Ramet sur l'axe fluvial de la Meuse et l'entrée de l'échelle à poissons (flèche jaune).



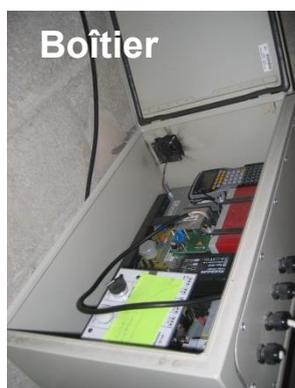
**Figure 9:** Vues aériennes (Google Earth) du site de barrage hydroélectriques d'Angleur sur l'axe fluvial de l'Ourthe et l'entrée de l'échelle à poissons (flèche jaune).



**Figure 10:** Vues de l'échelle à poissons du barrage d'Angleur sur la Basse Ourthe (Philippart et al. 2011)

### 2.2.2.1. Dispositif de détection

Le dispositif expérimental utilisé comprend un réseau des stations fixes de détection RFID automatique installées dans les échelles à poissons sur les axes fluviaux étudiés. Chaque station comporte un boîtier électronique relié à une antenne de détection fixée sur la paroi verticale de fente verticale d'un bassin amont dans des échelles à poissons (fig. 11). Les poissons marqués d'une puce électronique sont détectés lors de leurs passages sous l'antenne. Les stations de détection ont été placées en 2010 dans l'échelle à poissons de Monsin sur la Meuse et 2012 dans les deux autres échelles situées en amont (Yvoz-Ramet sur la Meuse et Angleur sur l'Ourthe).



**Figure 11** : Equipements d'une station CIPAM de détection automatique des anguilles marquées.

### 2.2.2. Suivi des migrations

De 2010 à 2014, le piège de l'ancienne échelle de Lixhe a été contrôlé deux jours par semaine. Cette fréquence de contrôle a été portée à trois jours par semaine dès l'observation du premier pic des captures des anguilles pendant la saison de migration. Les anguilles capturées dans le piège ont été anesthésiées (Eugénol: 0.5 mL/L), dénombrées, mesurées ( $\pm 1$  mm) et pesées ( $\pm 1$ g).

Les anguilles de taille  $>190$  mm ont été marquées par insertion chirurgicale de transpondeurs RFID à radiofréquence implantés dans la cavité abdominale de l'anguille. Les anguilles marquées ont été relâchées en un site unique situé sur la rive droite de la Meuse à 200 m en amont du barrage de Lixhe. Ce point de relâcher devrait permettre les anguilles marquées relâchées de continuer leur progression vers l'amont afin d'être automatiquement détectées lors leur passage sous les antennes de détection RFID installées dans les échelles à poissons à Monsin sur la Meuse et enfin, à Yvoz-Ramet sur la Meuse ou à Angleur sur l'Ourthe. En 2013, à cause de l'étude sur le taux d'utilisation de deux échelles à poissons du barrage de Lixhe par les anguilles migrantes (voir chapitre 2.1, toutes les anguilles capturées ont été relâchées 270 m en aval du barrage contre une très faible fraction d'anguilles recapturées qui a été relâchée sur le site habituel situé en amont du barrage.

Chaque anguille détectée a été caractérisée par :

- le code de la station de détection ;
- la date de détection ;
- l'heure de détection ;
- le nombre de détection ;
- la position finale (amont ou aval) par rapport au détecteur.

Pour des individus détectés plusieurs fois, la direction finale du mouvement a été identifiée d'après le nombre pair ou impair de détections. Un nombre pair reflète un demi-tour de l'anguille et un nombre de détection impair une direction finale vers l'amont.

Les observations réalisées ont porté sur :

- le taux de détection (nombre d'anguilles détectées x 100 / nombre d'anguilles marquées relâchées) ;
- l'axe de migration prioritaire des anguilles marquées relâchées :
  - (a) axe Meuse : - Station de Monsin (nombre d'anguilles détectées à Monsin x 100 / nombre total d'anguilles marquées relâchées),
    - Station d'Yvoz-Ramet (nombre d'anguilles détectées à Yvoz-Ramet x 100 / nombre total d'anguilles marquées relâchées) ;
  - (b) axe Ourthe : - Station d'Angleur (nombre d'anguilles détectées à Angleur x 100 / nombre total d'anguilles marquées relâchées) ;
- l'axe de migration prioritaire des anguilles détectées à la station de Monsin et redétectées dans les 2 autres stations amont (Yvoz-Ramet et Angleur) :

(a) axe Meuse : (nombre d'anguilles détectées à Yvoz-Ramet en provenance de Monsin x 100 / nombre total d'anguilles détectées dans les 3 stations : Monsin, Angleur et Yvoz-Ramet),

(b) axe Ourthe : (nombre d'anguilles détectées à Angleur en provenance de Monsin x 100 / nombre total d'anguilles détectées dans les 3 stations : Monsin, Angleur et Yvoz-Ramet) ;

- le temps de parcours (le nombre des jours d'intervalle entre la date du relâcher de l'anguille et la date de sa détection) ;
- la vitesse de migration (la distance entre le site de relâcher et la station de détection divisée par le nombre de jours de parcours) et;
- la distribution des fréquences des longueurs totales de tous individus marqués relâchés, de tous les individus détectés et de tous les individus détectés par station de détection.

Les Modèles Linéaires Généraux de Régression (GLM) ont été utilisés pour déterminer la relation entre :

- les poids au marquage des anguilles et leurs longueurs totales ;
- la longueur totale au marquage des anguilles et la date de détection;
- la date de capture des anguilles et la date de leurs détections;
- la longueur totale au marquage des anguilles et la vitesse de migration.

Le test de Kruskal-Wallis suivi si nécessaire du test de Mann-Whitney, a été utilisé pour comparer les trois stations de détection en ce qui concerne le temps de parcours, la vitesse de migration et la longueur totale au marquage chez les anguilles marquées détectées. La comparaison entre les trois stations de détection en termes de taux de détection des anguilles et de taux d'individus en amont des détecteurs été réalisée avec le test de probabilité exacte de Fisher. Le test de  $\chi^2$  a servi à la comparaison entre les deux axes fluviaux Meuse et Ourthe en ce qui concerne les taux d'anguilles détectées et, à la comparaison de l'abondance d'anguilles entre la détection simple et la détection multiple sous l'antenne de détection.

### **2.2.3. Résultats**

#### **2.2.3.1. Bilans des détections des anguilles**

Les bilans du nombre d'anguilles marquées relâchées et du nombre d'anguilles détectées montrent une variabilité du nombre d'individus marqués relâchés et du nombre d'individus détectés entre les années au cours des saisons des migrations 2010 – 2014 (tableaux 2 & 3). Au total,  $n = 1273$  anguilles de 211 mm – 882 mm ont été marquées et relâchées. Parmi les anguilles relâchées,  $n = 348$  anguilles de 250 mm – 755 mm (soit 27.3% des 1273 anguilles relâchées) ont été détectées en amont. Les tailles des anguilles détectées sont englobées dans les tailles des anguilles relâchées (fig. 12). Mais, l'important recouvrement des tailles entre ces deux groupes d'anguilles (anguilles relâchées et anguilles détectées) révèle l'efficacité du système fixe de détection RFID dans l'étude de la dynamique de migration d'une espèce des poissons à l'instinct cryptique dans un grand fleuve comme la Meuse. Par ailleurs, les bornes de tailles des anguilles détectées montrent les limites des tailles dans lesquelles ce système serait non sélectif pour la détection des anguilles.

Parmi les anguilles détectées, n = 314 anguilles (90.2% des 348 anguilles) ont été détectées à la station de détection RFID de Monsin. En revanche, n = 34 anguilles détectées (9.8%) ont contourné la station de détection de Monsin mais, elles ont été détectées dans les deux autres stations (Angleur et Yvoz-Ramet) situées en amont de Monsin. Ce qui suggère l'utilisation des routes alternatives aux échelles à poissons dans cette tranche des populations d'anguilles pour migrer vers les secteurs fluviaux amont.

A chaque station des détections RFID, les anguilles marquées relâchées ont été majoritairement détectées dans l'année où elles ont été relâchées. Entre les trois stations de détection, la saison maximum de détection apparaît plus étalée du 10 mai au 23 août (durée 105 jours) à la station de Monsin (tableaux 4, 5 & 6). Entre les stations de détection situées en amont de Monsin, la saison de migration est relativement plus courte à Angleur (29 mai au 11 août, durée 74 jours) situé sur l'Ourthe par rapport à Yvoz – Ramet (8 juin au 23 août, durée 76 jours) localisé sur la Meuse. La station de détection d'Yvoz – Ramet étant la station de détection la plus amont de toutes les trois stations montre une saison de détection qui commence tardivement.

Par contre, les dates des détections de 50% d'anguilles apparaissent plus précoces dans les deux stations situées sur la Meuse (2010-2014, dates de détection médiane : Monsin le 9 juillet et, Yvoz – Ramet le 11 juillet) par rapport à la station située sur l'Ourthe (Angleur le 23 juillet). La précocité de détection médiane dans la Meuse indépendamment de la localisation géographique de la station de détection pourrait être imputable à l'action de la température de l'eau hâtivement plus élevée dans la saison de migration dans ce cours d'eau par rapport à l'Ourthe. Cette particularité thermique dans cette partie étudiée de la Meuse proviendrait de l'action des eaux de refroidissement des centrales nucléaires de Tihange situées en amont d'Yvoz-Ramet, lesquelles augmentent la température de la Meuse.

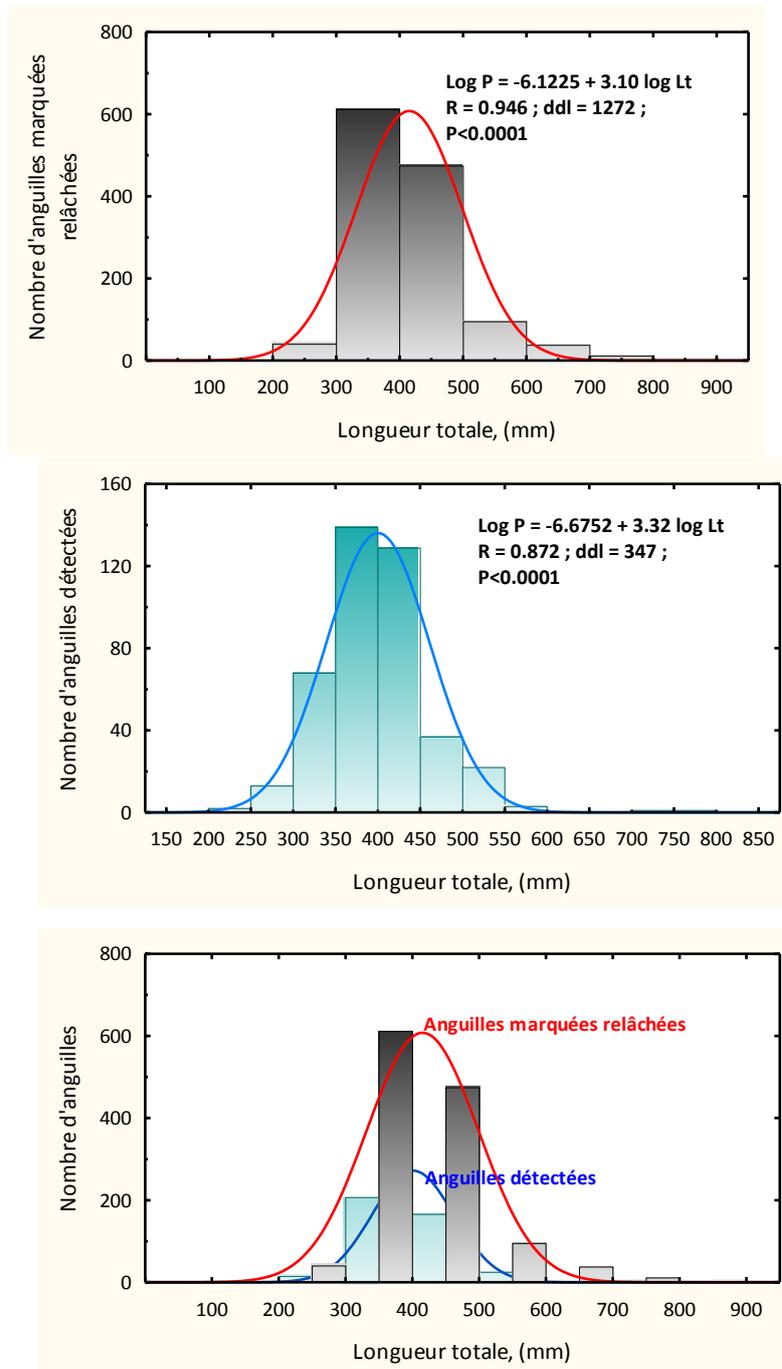
A l'échelle du cycle journalier, l'activité migratoire est majoritairement nocturne dans les trois stations des détections. En revanche, les heures des migrations apparaissent plus étendues dans les stations de détection situées sur la Meuse (2010-2014, heures de détection : Monsin 10h00-6h00 et, Yvoz – Ramet 12h00-6h00) par rapport à la station localisée sur l'Ourthe (Angleur 24h00-6h00). L'heure de détection médiane est observée plus tôt dans l'Ourthe (Angleur à 2h00) que dans la Meuse (Monsin 4h00 et, Yvoz – Ramet 3h00).

**Tableau 2: Synthèse annuelle du nombre d'anguilles marquées relâchées et du nombre d'anguilles détectées, dans toutes les stations de détection réunies au cours des saisons des migrations 2010 – 2014. Effort de détection en : 2010-2011 Monsin seul et 2012-2014 Monsin, Yvoz-Ramet et Angleur ; positions amont (n = 27) et aval (n=354) concernent les anguilles relâchées en 2013 ; positions amont (n = 4/27 en 2013) et aval (n=34/354 en 2013 et n=30/354 en 2014) concernent les anguilles détectées à partir des anguilles relâchées en 2013.**

Année	Nombre d'anguilles relâchées			Nombre d'anguilles détectées par position de relâcher, (%)		Nombre total d'anguilles détectées, (%)
	Total	Position par barrage de Lixhe		Amont	Aval	
		Amont	Aval	Amont	Aval	
2010	89	-	-	-	-	21 (23.6)
2011	212	-	-	-	-	11 (5.2)
2012	370	-	-	-	-	58 (15.7)
2013	379	27	354	4 (14.8)	34 (9.6)	111 (29.1)
2014	221	-	-	-	30 (8.5)	147 (66.5)
<b>Total</b>	<b>1273</b>	<b>27</b>	<b>354</b>	<b>4 (14.8)</b>	<b>64 (18.1)</b>	<b>348 (27.3)</b>

**Tableau 3: Bilans des détections des anguilles relâchées, avec détection à la station de Monsin ou pas au cours des saisons des migrations 2010 – 2014.**

Station et année de détection	Nombre d'anguilles détectées	Nombre d'anguilles non détectées à Monsin	Nombre d'anguilles détectées à la station de Monsin						
			Total	Année de détection					
				2010	2011	2012	2012+2013	2013	2014
Monsin 2010	21	-	21	21	-	-	-	-	-
Monsin 2011	11	-	11	1	10	-	-	-	-
Monsin 2012	52	-	52	-	8	44	-	-	-
Monsin 2013	101	-	101	2	8	58	-	33	-
Monsin 2014	129	-	129	-	1	10	-	34	84
<b>Total</b>	<b>314</b>	<b>-</b>	<b>314</b>	<b>24</b>	<b>27</b>	<b>112</b>	<b>-</b>	<b>67</b>	<b>84</b>
Yvoz-Ramet 2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yvoz-Ramet 2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yvoz-Ramet 2012	14	3	11	-	-	11	-	-	-
Yvoz-Ramet 2013	31	7	24	-	-	7	1	16	-
Yvoz-Ramet 2014	14	4	10	-	-	-	-	-	10
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>14</b>	<b>45</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>18</b>	<b>1</b>	<b>16</b>	<b>10</b>
Angleur 2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Angleur 2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Angleur 2012	4	3	1	-	-	1	-	-	-
Angleur 2013	9	3	6	-	-	-	-	6	-
Angleur 2014	29	14	15	-	-	-	-	1	14
<b>Total</b>	<b>42</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>7</b>	<b>14</b>



**Figure 12:** Distributions des fréquences des longueurs totales chez les anguilles marquées relâchées (n = 1273) et les anguilles détectées (n = 348) au cours des saisons des migrations 2010 – 2014. P, poids ; Lt, longueur totale.

**Tableau 4: Bilan des détections des anguilles à la station de Monsin au cours des saisons des migrations 2010 – 2014.**

Année	Année de marquage	Nombre d'anguilles détectées			Nombre de détections en		Temps d'intervalle entre la première et la dernière détection en		Position		Dates des détections		Heures des détections	
		Total	Détection simple	Détection multiple	détection multiple		multiple		Amont	Aval	Min - max	Médiane	Min - max	Médiane
					Min - max	Médiane	Min - max	Médiane						
<b>2010</b>														
	2010	21	16	-	-	-	-	-	16	-	25 juin-15 août	11 juil	24h-5h	4h
	<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>25 juin-15août</b>	<b>11 juil</b>	<b>24h-5h</b>	<b>4h</b>
<b>2011</b>														
	2010	1	1	-	-	-	-	-	1	-	2 juil	2 juil	21h	21h
	2011	10	7	3	7-72	32	5j-6j	5j	8	2	10 mai-23 août	3 juil	2h-6h	4h
	<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>7-72</b>	<b>32</b>	<b>5j-6j</b>	<b>5j</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>10 mai-23août</b>	<b>2 juil</b>	<b>21h-6h</b>	<b>5h</b>
<b>2012</b>														
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	8	3	5	3-4199	6	20min-3j	1h30min	7	1	26 mai-18 août	7 juil	21h-3h	5h
	2012	44	18	26	2-139	5	7min-16j	42min	27	17	30 mai-20 août	29 juil	17h-8h	4h
	<b>Total</b>	<b>52</b>	<b>21</b>	<b>31</b>	<b>2-4199</b>	<b>6</b>	<b>7min-16j</b>	<b>46min30s</b>	<b>34</b>	<b>18</b>	<b>26 mai-20août</b>	<b>28 juil</b>	<b>17h-8h</b>	<b>4h</b>
<b>2013</b>														
	2010	2	1	1	4	4	1h	1h	1	1	24juil-30juil	27juil	2h-4h	3h
	2011	8	1	7	3-22	7	33min-22h	5h	4	4	7juil-29juil	18juil	10h-5h	3h
	2012	58	22	36	2-50	8	1s-19j	2h	37	21	18avril-4août	10juil	11h-8h	4h
	2013	33	19	14	2-73	5	13min-23h	57min	26	7	20mai-17août	29juil	13h-6h	4h
	<b>Total</b>	<b>101</b>	<b>43</b>	<b>58</b>	<b>2-73</b>	<b>6</b>	<b>1s-19j</b>	<b>2h</b>	<b>68</b>	<b>33</b>	<b>18avril-17août</b>	<b>16juil</b>	<b>10h-8h</b>	<b>4h</b>
<b>2014</b>														
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	1	-	1	8	8	38min	38min	-	1	11 juin	11 juin	3h	3h
	2012	10	-	10	8-800	81	26min-1mois20j	4j23h	6	4	4 juin-8 juil	8 juin	15h-5h	4h
	2013	34	1	33	4-600	51	27min-1mois23j	2j22min	10	24	4 juin-25 juil	12 juin	13h-5h	3h
	2014	84	5	79	2-2555	34	10min-1mois10j	1j21h	43	41	5 juin-8 août	30 juin	15h-6h	3h
	<b>Total</b>	<b>129</b>	<b>6</b>	<b>123</b>	<b>2-2555</b>	<b>44</b>	<b>10min-1mois10j</b>	<b>2j19min</b>	<b>59</b>	<b>70</b>	<b>4 juin - 8août</b>	<b>23 juin</b>	<b>13h-6h</b>	<b>3h</b>

**Tableau 5: Bilan des détections des anguilles à la station d'Yvoz-Ramet au cours des saisons des migrations 2012 – 2014.**

Année	Année de marquage	Nombre d'anguilles détectées			Nombre de détections en détection multiple		Temps d'intervalle entre la première et la dernière détection en détection multiple		Position		Dates des détections		Heures des détections	
		Total	Détection simple	Détection multiple	Min - max	Médiane	Min - max	Médiane	Amont	Aval	Min - max	Médiane	Min - max	Médiane
<b>2012</b>														
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	2	2	-	-	-	-	-	2	-	7 juil-7 juil	7 juil	2h-4h	3h
	2012	12	8	4	2-4	3	17min-38min	24min	8	4	1 juil-23 août	12 août	24h-5h	3h
	<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>2-4</b>	<b>3</b>	<b>17min-38min</b>	<b>24min</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>1 juil-23 août</b>	<b>7 août</b>	<b>24h-5h</b>	<b>3h</b>
<b>2013</b>														
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	8	7	1	1-2	1	4min	4min	7	1	13juin-23juil	18juin	24h-5h	2h30min
	2012	15	11	4	1-21	1	2s-9j	19min	12	3	8juin-21juil	10juin	24h-6h	2h
	2013	8	7	1	1-2	1	12min	12min	7	1	12juil-30juil	27juin	24h-5h	4h
	<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>25</b>	<b>6</b>	<b>1-21</b>	<b>1</b>	<b>2s-9j</b>	<b>8min</b>	<b>26</b>	<b>5</b>	<b>8juin-30juil</b>	<b>12juil</b>	<b>24h-6h</b>	<b>3h</b>
<b>2014</b>														
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	1	1	-	-	-	-	-	1	-	10 juin	10 juin	2h	2h
	2012	2	2	-	-	-	-	-	2	1	11 juin-14 juin	12 juin	1h-3h	2h
	2013	5	3	2	2-3	3	8s-23min	12min	4	3	9 juin-9 juil	20 juin	24h-5h	4h
	2014	6	2	4	2-3	3	1min-4h	12min	3	3	15 mai-28 juil	4 juil	12h-5h	3h
	<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>2-3</b>	<b>2</b>	<b>8s-4h</b>	<b>12min</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>8 juin - 11 août</b>	<b>24 juin</b>	<b>12h-5h</b>	<b>3h</b>

**Tableau 6: Bilan des détections des anguilles à la station d'Angleur au cours des saisons des migrations 2012 – 2014.**

Année	Année de marquage	Nombre d'anguilles détectées			Nombre de détections en détection multiple		Temps d'intervalle entre la première et la dernière détection en détection multiple		Position		Dates des détections		Heures des détections	
		Total	Détection simple	Détection multiple	Min - max	Médiane	Min - max	Médiane	Amont	Aval	Min - max	Médiane	Min - max	Médiane
<b>2012</b>														
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	2	2	-	-	-	-	-	2	-	29 mai-31 mai	29 mai	1h-1h	1h
	2012	2	1	1	4	4	1h2min	1h2min	1	1	1 juil-7 août	23 juil	24h-5h	15h
	<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>1h2min</b>	<b>1h2min</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>29 mai – 7 août</b>	<b>13 juin</b>	<b>24h-5h</b>	<b>3h</b>
<b>2013</b>														
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	2	-	2	5-9	7	21min-3j	1j12h	2	-	16 juil-22 juil	22 juil	2h-3h	2h30min
	2012	6	3	3	4-9	8	43min-2h	1h42min	4	2	23 juin-4 août	25 juil	1h-4h	2h
	2013	1	-	1	3	3	1j	1j	1	-	2 août	2 août	3h	3h
	<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3-9</b>	<b>4</b>	<b>21min-3j</b>	<b>1h51min</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>23 juin-4 août</b>	<b>22 juil</b>	<b>1h-4h</b>	<b>3h</b>
<b>2014</b>														
	2010	1	-	1	9	9	22min	22min	1	-	20 juil	20 juil	4h	4h
	2011	1	-	1	186	186	54min	54min	-	1	17 juil	17 juil	3h	3h
	2012	5	-	5	2-430	4	20min-4h	34min	2	3	8 juin-26 juil	22 juin	1h-3h	1h
	2013	9	5	4	2-276	9	0.02min-36min	14 min	6	3	8 juin-11 août	24 juil	24h-6h	5h
	2014	13	8	5	2-188	3	0.05min-2h	35 min	10	3	2 juil-9 août	31 juil	22h-5h	2h
	<b>Total</b>	<b>29</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>2-430</b>	<b>5</b>	<b>0.02min-4h</b>	<b>23 min</b>	<b>19</b>	<b>10</b>	<b>8 juin - 11 août</b>	<b>24 juil</b>	<b>24h-6h</b>	<b>2h</b>

A la station d'Yvoz – Ramet sur la Meuse, la majorité des anguilles  $n = 43$  (72.9% des 59 anguilles détectées) ont été détectées en un seul passage (test du  $\chi^2$ ,  $p = 0.0013$ ) sous l'antenne de détection placée dans les échelles à poissons. En revanche, plusieurs passages par anguille sous l'antenne (min-max 2-430 détections ; médiane 5 détections) ont été observés chez les anguilles détectées  $n = 23$  (54.8% des 42 anguilles détectées) à Angleur sur l'Ourthe. Ce phénomène des passages multiples par anguille s'amplifie à la station de Monsin sur la Meuse (min-max 2-4199 détections ; médiane 20 détections) et atteint un nombre record d'anguilles  $n = 215$  (68.5% des 314 anguilles détectées).

Dans les trois stations, l'analyse des passages des anguilles migrantes sous l'antenne de détection RFID situe significativement (Probabilité exacte de Fisher,  $p < 0.00001$ ) les anguilles en position amont par rapport aux détecteurs. Les taux des passages des anguilles vers l'amont sont plus élevés sur les stations amont : Angleur (2012-2014, taux de passage vers l'amont : 70.7% des 42 anguilles détectées) et Yvoz – Ramet (78.0% des 59 anguilles détectées) que le taux observé sur la station aval, Monsin (60.2% des 314 anguilles détectées). Les taux importants de migration en direction de l'amont observé à Angleur et Yvoz-Ramet signifient que le processus de colonisation vers l'amont chez certaines anguilles capturées, marquées et relâchées à Lixhe continue bien au-delà de ces stations. Ce qui pourrait contribuer aux recrutements naturels en populations d'anguilles dans certains affluents de la Meuse et l'Ourthe.

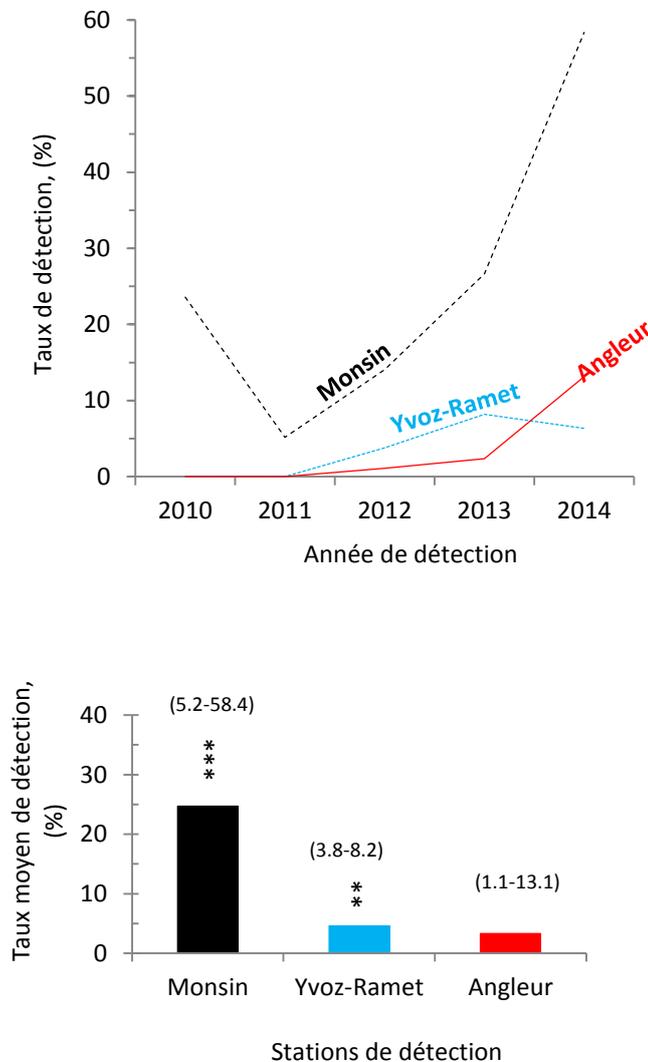
En revanche, à la station de Monsin, le nombre d'anguilles  $n = 215$  (68.5% des 314 anguilles détectées) détectées en détections multiples lors de leurs passages sous le détecteur et le nombre d'anguilles  $n = 123$  (39.8% des 314 anguilles détectées) détectées en position finale aval par rapport à l'antenne de détection sont très élevés. Cette situation pourrait s'expliquer par un mauvais réglage de la vanne d'alimentation, lequel créerait artificiellement une vitesse de courant trop importante pour sortir de l'échelle.

### **2.2.3.2. Axes de migration**

Des 1273 anguilles marquées et relâchées,  $n = 314$  anguilles (24.7%) ont été détectées à la station de Monsin sur la Meuse contre  $n = 101$  anguilles (7.9%) détectées dans les deux stations amont notamment à Angleur sur l'Ourthe avec  $n = 42$  anguilles (3.3%) et à Yvoz-Ramet sur la Meuse avec  $n = 59$  anguilles (4.6%) (fig. 13). Le test de Probabilité exacte de Fisher permet d'affirmer l'axe Meuse depuis le site de relâcher vers Yvoz-Ramet comme l'axe de migration privilégié par les anguilles ( $p < 0.001$ ) au détriment de l'axe Ourthe du site de relâcher vers Angleur.

De 2010 à 2014, Monsin la station la plus proche du lieu de relâcher des anguilles marquées montre annuellement le taux de détection le plus élevé (Probabilité exacte de Fisher,  $p < 0.000001$ ). Dans les stations amont à Monsin, la station d'Yvoz-Ramet présente des taux de détection supérieurs ( $p < 0.000001$ ) à ceux observés à la station d'Angleur, de 2012 à 2013. Mais, cette tendance s'inverse en 2014 et le taux de détection à Angleur devient supérieur ( $p < 0.000001$ ) à celui à Yvoz-Ramet. Cette situation pourrait s'expliquer par l'hiver très doux connu en 2013 – 2014, qui aurait réduit les amplitudes thermiques

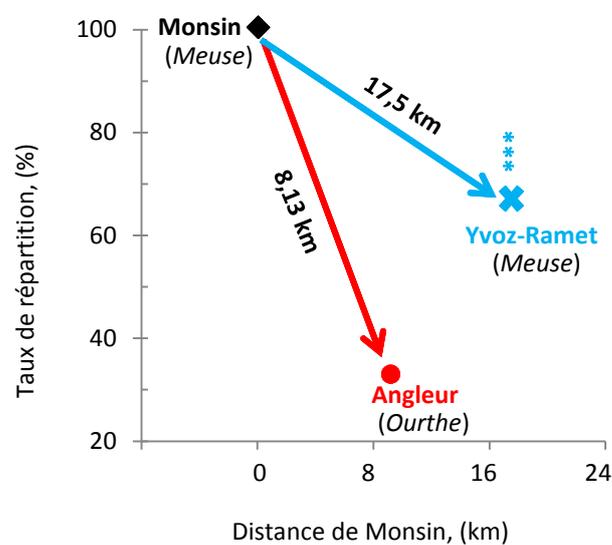
annuelles dans ces cours d'eau, maintenu la température de l'eau dans les gammes convenant à l'activité migratoire des anguilles et donc, accru l'attractivité de l'axe Ourthe.



**Figure 13:** Evolution annuelle du taux des détections des anguilles marquées relâchées à Lixhe et taux moyen des détections des anguilles dans les stations des détections RFID sur la Meuse (Monsin et Yvoz-Ramet) et l'Ourthe (Angleur), cours des saisons des migrations 2010 – 2014. Nombre total d'anguilles marquées relâchées n = 1273 ; nombre total d'anguilles détectées : Monsin n = 314, Yvoz-Ramet n = 59 et Angleur n = 42. Seuil de significativité, \*\* p < 0.001 et \*\*\* p < 0.000001 du test de probabilité exact de Fisher.

Parmi les anguilles détectées à Monsin, n = 67 anguilles (21.3% de 314 anguilles) ont été détectées à nouveau dans l'une de deux stations amont, à Angleur sur l'Ourthe ou à Yvoz-Ramet sur la Meuse au cours d'une même année ou dans l'année qui suit leurs détections à Monsin. L'étude de progression vers l'amont de ces individus révèle que n =

45 anguilles (67.2% de 67 anguilles détectées à Monsin) progressent sur l'axe Meuse de Monsin vers Yvoz-Ramet contre n = 22 anguilles (32.8%) qui choisissent de migrer sur l'axe Ourthe, de Monsin vers Angleur (fig. 14). Entre ces deux axes migratoires, le test du  $\chi^2$  permet de rejeter l'hypothèse d'une répartition en égale proportion des anguilles migrantes en provenance de Monsin vers l'axe Meuse à Yvoz-Ramet et vers l'axe Ourthe à Angleur (ratio Meuse : Ourthe, 2.05 : 1,  $p < 0.000001$ ). Ce qui confirme comme pour les résultats des détections des anguilles en provenance du site de relâcher que l'axe Meuse constitue la voie de migration privilégiée par les anguilles en montaison. L'action des eaux de refroidissement des centrales nucléaires de Tihange déversées dans la Meuse en amont d'Yvoz-Ramet sur la température de l'eau de ce grand fleuve pourrait exercer un rôle attractif chez les anguilles.



**Figure 14:** Répartition (en %) des anguilles détectées à Monsin sur la Meuse entre l'axe fluvial de la Meuse de Monsin vers Yvoz-Ramet et l'axe fluvial de l'Ourthe de Monsin vers Angleur au cours des saisons des migrations 2010 – 2014. Monsin n = 67, Yvoz-Ramet n = 45 et Angleur n = 22 ; \*\*\*  $p < 0.000001$ , test du  $\chi^2$ .

D'autres anguilles n = 34 (2.7% des 1273 anguilles relâchées à Lixhe) n'ont pas été détectées à la station de Monsin mais elles ont été détectées dans les stations situées en amont de Monsin. Dans ce groupe particulier d'anguilles, n = 25 anguilles (73.5% des 34 anguilles) détectées proviennent des lots d'anguilles relâchées en 2012 et en 2014, sur le site situé en amont du barrage de Lixhe, contre n = 9 anguilles (26.5%) relâchées en 2013 (tableaux 7 & 8). Avec l'installation des stations RFID de détection automatique dans les deux échelles du barrage de Lixhe en 2013 pour étudier le taux d'utilisation de ces deux ouvrages, l'examen du lot d'anguilles relâchées au cours de cette année nous intéresse. En effet, le relâcher des anguilles en 2013 a eu lieu en deux sites. Le premier site est situé en amont du barrage de Lixhe à l'endroit habituel de relâcher des anguilles effectué depuis 2010 et le deuxième site est situé en aval de ce barrage. Le premier site a servi au relâcher d'une fraction minoritaire d'anguilles constituée des individus marqués recapturés n = 27

(7.1% de 381 anguilles marquées relâchées) alors que le deuxième site était le lieu de relâcher d'une fraction majoritaire d'anguilles composée des individus marqués non recapturés n = 354 (92.9%).

Les résultats de l'analyse de ces 9 anguilles ayant contournées la station de détection de Monsin montrent que ces anguilles n = 9 (100%) ont été relâchées en aval du barrage de Lixhe, avec n = 7 anguilles (77.8%) non détectées dans les échelles à poissons de Lixhe et n = 2 anguilles (22.2%) détectées dans les échelles de ce barrage. De ces 2 anguilles détectées à Lixhe, l'une était en position finale aval par rapport à l'antenne de détection et l'autre en position amont. Il est fort probable que l'anguille en position amont soit redescendue en aval du barrage via les voies de migration alternatives aux échelles à poissons. La migration de l'aval du barrage vers les secteurs fluviaux amont de la Meuse se serait effectuée comme pour les autres anguilles n = 9 via le canal Albert. En effet, le barrage de Lixhe n'étant pas équipé d'écluse, est potentiellement contournable via les écluses de Lanaye permettant de relier par le canal Albert, la Meuse en aval de Lixhe et la Meuse en amont de Monsin. Le canal Albert est un canal à grand gabarit reliant le bassin de la Meuse au bassin de l'Escaut. Mais, l'autre possibilité des routes de migration de l'anguille détectée en position amont à Lixhe est la progression vers amont depuis Lixhe pour ensuite contourner la station de détection de Monsin via l'écluse de Monsin ou autres routes alternatives à l'échelle à poissons de Monsin pour rejoindre la Meuse en amont de Monsin. Cette dernière argumentation expliquerait la non détection à Monsin de certaines anguilles relâchées à Lixhe qui ne seraient détectées que dans les stations situées en amont.

**Tableau 7: Nombre d'anguilles non détectées à Monsin mais détectées dans les deux stations amont (Angleur et Yvoz-Ramet) au cours des saisons des migrations 2010 – 2014.**

Station et année de détection	Nombre d'anguilles non détectées à la station de Monsin					
	Nombre total	Nombre par année				
		2010	2011	2012	2013	2014
Angleur 2010	-	-	-	-	-	-
Angleur 2011						
Angleur 2012	3		2	1		
Angleur 2013	3		3	1		
Angleur 2014	14	1	1	3	6	3
<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
Yvoz-Ramet 2010	-	-	-	-	-	-
Yvoz-Ramet 2011						
Yvoz-Ramet 2012	3			2		
Yvoz-Ramet 2013	7		3	2	2	
Yvoz-Ramet 2014	4		1		1	2
<b>Total</b>	<b>14</b>		<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>



## 2.2.3.2. Comportements des migrations des anguilles détectées

### 2.2.3.2.1. Détection au cours deux années consécutives

L'analyse des résultats de détection des anguilles révèle la présence de  $n = 3$  anguilles (0.96% des 314 anguilles détectées à Monsin) détectées au cours de deux années consécutives à la station de détection de Monsin (tableau 9). En revanche, ce type de comportement n'apparaît pas dans les deux autres stations de détection (Angleur et Yvoz-Ramet) en amont à Monsin.

L'analyse des paramètres des détections montre que ces  $n = 3$  anguilles sont en position finale amont par rapport au détecteur de la station de détection de Monsin pendant la première année de leur détection correspondant à l'année de leur marquage RFID et leur relâcher. La deuxième année, ces trois anguilles repartent de l'amont de l'échelle et se retrouvent  $n = 2$  anguilles dans la partie aval de la Meuse contre  $n = 1$  anguille qui remonte vers l'amont. Ceci révèle que certaines anguilles changent des secteurs fluviaux (milieu de vie) plusieurs fois pendant la phase de vie continentale. En revanche, d'autres anguilles résident pendant plusieurs saisons sur un même secteur du bassin hydrographique de la Meuse belge.

**Tableau 9:** Comportements de migration des anguilles détectées au cours de deux années consécutives à la station de détection de Monsin.

Capture – marquage – remise à l'eau à Lixhe				Détection à Monsin				
Marque	Date	Longueur totale (mm)	Poids (g)	Année	Date	Heure	Nombre	Position
AD1D6F5	8/07/2013	413	109	2013	25/07/2013	02:33:59	1	Amont
				2014	25/07/2014	13:14:29	13	Aval
AAE9F20	9/07/2012	363	57	2012	17/08/2012	05h12	5	Amont
				2013	6/07/2013	04:21:54	4	Amont
A6C4BE6	11/05/2012	391	87	2012	28/07/2012	03h29	3	Amont
				2013	7/07/2013	04:45:11	5	Aval

### 2.2.3.2.2. Détection d'une anguille dans deux stations de détection RFID

La détection d'une même anguille dans deux stations distinctes de détection représente un effectif total de  $n = 67$  anguilles. Ce type de détection a été principalement observée dans deux combinaisons de deux stations notamment la combinaison Monsin et Yvoz-Ramet  $n = 45$  anguilles (67.2% des 67 anguilles) et la combinaison Monsin et Angleur  $n = 22$  anguilles (32.8%) (tableau 2). Dans ces deux combinaisons, la majorité d'anguilles ont été détectées dans l'année de leurs captures et leurs remises à l'eau, à Monsin et Yvoz-Ramet  $n = 31$  individus (68.9% des 45 anguilles détectées) et à Monsin et Angleur  $n = 20$  individus (90.9% des 22 anguilles détectées). En revanche, aucune anguille n'a été détectée dans la

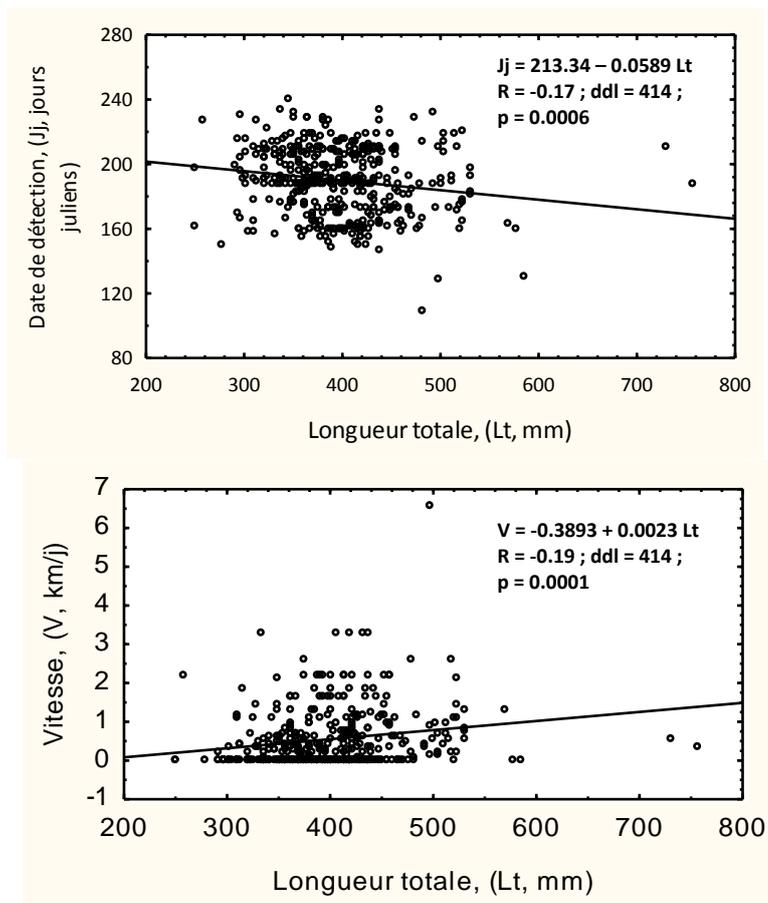
combinaison Yvoz-Ramet sur la Meuse et Angleur sur l'Ourthe. Ceci semble indiquer que les anguilles du bassin de la Meuse ne changent pas d'axe fluvial lorsque le choix de l'axe migratoire est effectué.

#### **2.2.3.2.3. Détection des anguilles plusieurs années après le marquage RFID**

Les résultats des bilans des détections des anguilles au cours des saisons des migrations 2010 – 2014 montrent une baisse du nombre d'individus détectés après leurs déversements (tableau 2). En 2014 à Monsin par exemple,  $n = 34$  individus (26.4% des 129 anguilles détectées) détectés ont été marqués en 2013 contre  $n = 10$  individus (7.8%) détectés ont été marqués en 2012 et seulement  $n = 1$  individu (0.8%) détecté a été marquée et relâchée en 2011. A Angleur en 2014, une seule anguille (3.4% des 29 anguilles détectées) détectée a été marquée et relâchée en 2013. En revanche, à Yvoz-Ramet au cours de la même année, aucune anguille marquée avant 2014 n'a été détectée. Cette constatation suggère que certaines anguilles marquées et relâchées à Lixhe résident pendant plusieurs années dans le secteur fluvial de leur déversement après le marquage avant éventuellement de reprendre l'activité migratoire.

#### **2.2.3.2.4. Temps de parcours et vitesse de migration**

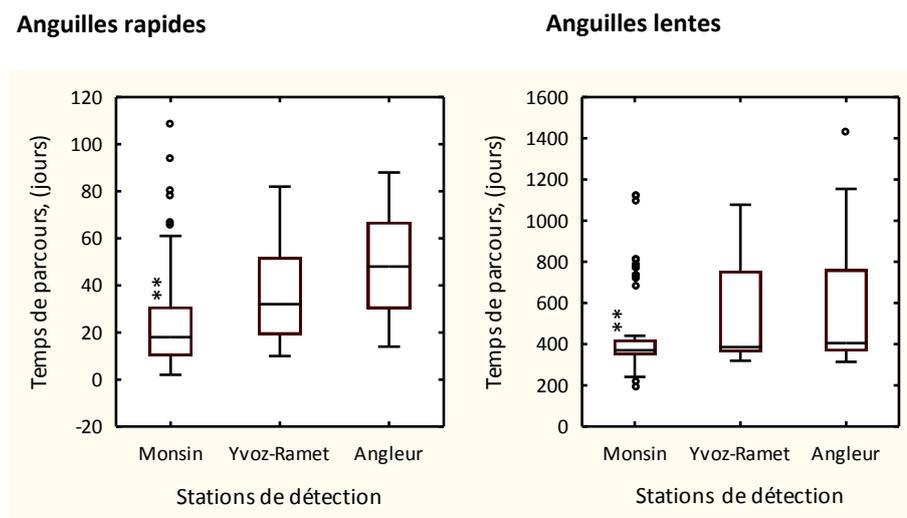
Au cours des saisons des migrations 2010-2014 dans les trois stations de détection RFID, la date de détection des anguilles ne corrèle pas significativement avec la date de leurs captures ( $F = 1.779$ ;  $R = 0.067$ ;  $p = 0.1823$ ,  $ddl = 414$ ). En revanche, la date des détections des anguilles est négativement liée à la taille des anguilles lors de leurs captures ( $F = 11.946$ ;  $R = -0.17$ ;  $p = 0.0006$ ,  $ddl = 414$ ). Cette même taille des anguilles corrèle positivement avec la vitesse de migration des anguilles ( $F = 14.941$ ;  $R = 0.19$ ;  $p = 0.0001$ ,  $ddl = 414$ ) (fig. 15). Autrement dit, les anguilles de grande taille sont détectées tôt au cours d'une saison de migration parce qu'elles migrent à une vitesse plus élevée que les anguilles de petite taille. Ce qui traduit que la capacité de nage de ces anguilles en montaison diffère selon leur taille et donc leur stade de développement.



**Figure 15:** Relation entre la longueur totale des anguilles détectées et la date de leurs détections et, entre la longueur totale des anguilles détectées et la vitesse de leurs migrations, toutes les trois stations réunies, au cours des saisons des migrations 2010 – 2014.

Certaines anguilles appelées anguilles rapides  $n = 229$  (55.1 % de la somme d'anguilles détectées dans les trois stations  $n = 415$  anguilles) ont été détectées dans l'année de leurs captures (fig. 16). En revanche, d'autres anguilles appelées anguilles lentes  $n = 186$  (44.9%) ont été détectées au cours des années qui suivent l'année de leurs captures. Le nombre d'anguilles rapides à la station de Monsin  $n = 191$  (60.8% des 415 anguilles détectées) est significativement plus élevé (test du  $\chi^2$ ,  $p < 0.000001$ ) que le nombre d'anguilles lentes  $n = 123$  (39.2%). Mais, cette tendance s'inverse dans les deux stations de détection situées en amont de Monsin où le nombre d'anguilles lentes (Yvoz-Ramet  $n = 36$  et Angleur  $n = 27$ ) est significativement plus élevé ( $p < 0.001$ ) que le nombre d'anguilles rapides (Yvoz-Ramet  $n = 23$  et Angleur  $n = 15$ ). Cette inversion de tendance d'abondance des anguilles rapides et des anguilles lentes entre la station aval et les stations amont pourrait provenir de la proximité de la station de Monsin du site de relâcher et du nombre important d'anguilles en position finale aval à Monsin qui certes n'évoluent pas vers Yvoz-Ramet et Angleur.

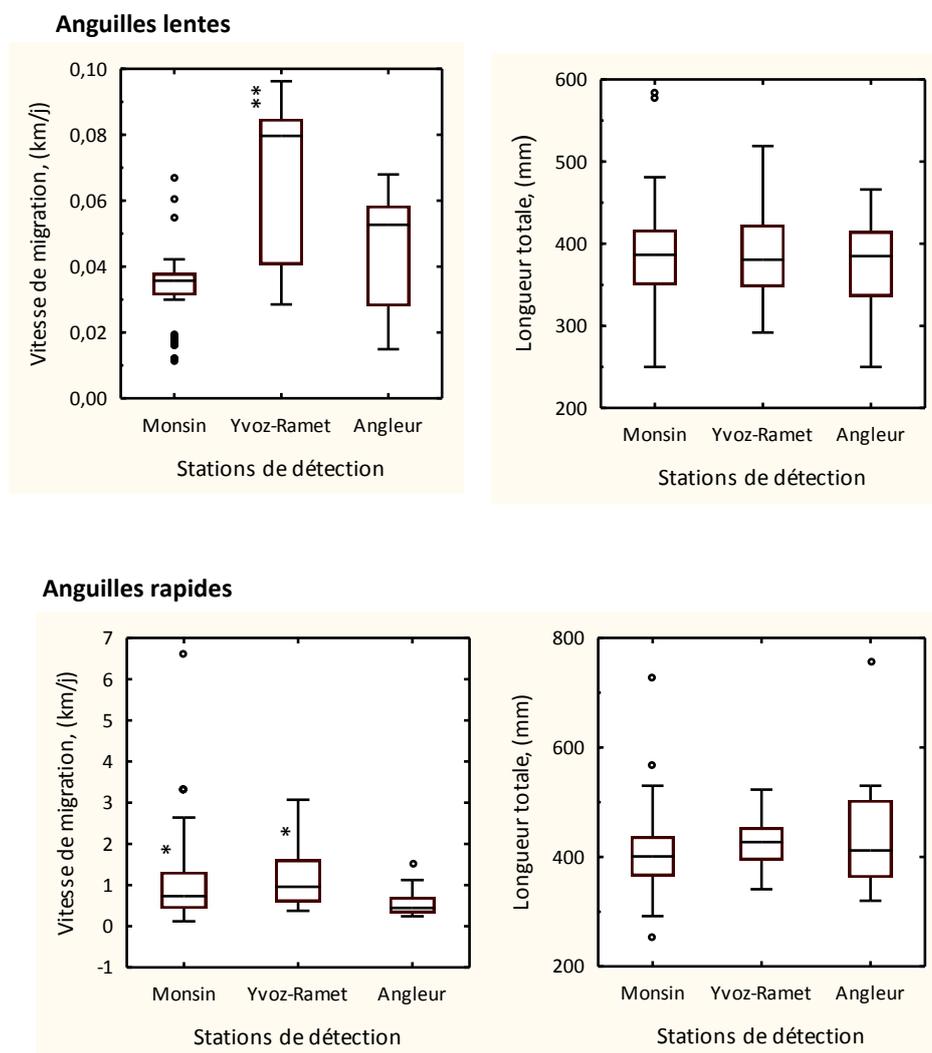
D'ailleurs, le temps médian de parcours entre le site de relâcher et la station de détection est significativement plus court à Monsin (18 jours), la station la plus proche du site de relâcher des anguilles (Mann-Whitney,  $p < 0.01$ ) chez les anguilles rapides. En revanche, pour ce même groupe d'anguilles, ce temps de parcours ne diffère pas significativement entre les deux stations en amont de Monsin (Yvoz-Ramet, 32 j et Angleur, 48 j). C'est également dans la Meuse à Monsin (temps médian, 370 jours) que les anguilles lentes sont vite détectées (Mann-Whitney,  $p < 0.01$ ) par rapport à Yvoz-Ramet (386 j ou Angleur (405 j)).



**Figure 16:** Distributions des fréquences des temps de parcours entre le site de relâcher des anguilles et les stations des détections RFID sur la Meuse (Monsin et Yvoz-Ramet) et l'Ourthe (Angleur) chez les anguilles lentes et les anguilles rapides au cours des saisons des migrations 2010 – 2014. Nombre d'anguilles lentes et nombre d'anguilles rapides : Monsin  $n = 123$  et  $191$ , Yvoz-Ramet  $n = 36$  et  $23$ , Angleur  $n = 27$  et  $15$ . Seuil de significativité, \*\*  $p < 0.01$  des tests de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney.

Les anguilles rapides de la Meuse (vitesse médiane : Monsin  $0.73$  km/j ; Yvoz-Ramet  $0.96$  km/j) migrent plus vite (Mann-Whitney,  $p < 0.05$ ) par rapport aux anguilles rapides de l'Ourthe (Angleur  $0.45$  km/j) (fig. 17). Sur base de la durée de la saison maximale des détections des anguilles dans les trois stations de détection (Monsin  $105$  j ; Yvoz-Ramet  $76$  j ; Angleur  $74$  j), les anguilles rapides de la Meuse parcourent potentiellement plus des distances annuellement (Monsin  $55.5$  km ; Yvoz-Ramet  $73$  km) que celles détectées dans l'Ourthe (Angleur  $33$  km). Mais, les anguilles rapides détectées dans la Meuse en amont (Yvoz-Ramet) et en aval (Monsin) ne diffèrent pas significativement (Mann-Whitney,  $p > 0.05$ ). Pour les anguilles lentes, les anguilles détectées à Yvoz-Ramet ( $0.08$  km/j) la station la plus éloignée du site de relâcher migrent plus vite (Mann-Whitney,  $p < 0.001$ ) que les anguilles lentes détectées les deux autres stations à Monsin ( $0.04$  km/j) et à Angleur ( $0.05$  km/j). Les anguilles lentes d'Yvoz-Ramet peuvent parcourir  $6.1$  km annuellement contre  $4.2$  km chez les anguilles lentes de Monsin et  $3.7$  km chez les anguilles lentes d'Angleur.

Concernant la taille corporelle des anguilles migrantes dans les trois stations, les anguilles rapides (longueur totale : Monsin 401 mm ; Yvoz-Ramet 427 mm ; Angleur 412 mm) sont significativement plus grandes (Mann-Whitney,  $p < 0.01$ ) que les anguilles lentes (Monsin 387 mm ; Yvoz-Ramet 381 mm ; Angleur 385 mm). En revanche, au sein de chaque groupe d'anguilles (anguilles rapides et anguilles lentes), la taille corporelle des anguilles ne diffère pas significativement (Kruskall-Wallis,  $p > 0.05$ ) entre les trois stations de détection. De même, au sein d'un même groupe d'anguilles, la taille des anguilles ne diffère pas significativement ( $p > 0.05$ ) entre les deux cours d'eau, la Meuse et l'Ourthe. Cela signifie que la taille de l'anguille influence la vitesse de migration mais elle n'agit pas de façon isolée sur le processus biologique de dispersion, lequel est fortement sous la dépendance de la densité des populations.



**Figure 17:** Distributions des fréquences des vitesses de migration et des longueurs totales chez les anguilles lentes et les anguilles rapides, détectées dans les stations des détections RFID sur la Meuse (Monsin et Yvoz-Ramet) et l'Ourthe (Angleur) au cours des saisons des migrations 2010 – 2014. Nombre d'anguilles lentes et nombre d'anguilles rapides : Monsin  $n = 123$  et  $191$ , Yvoz-Ramet  $n = 36$  et  $23$ , Angleur  $n = 27$  et  $15$ . Seuil de significativité, \*  $p < 0.05$  et \*\*  $p < 0.0001$  des tests de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney.

#### 2.2.4. Discussion

La présente étude réalisée sur un réseau des stations RFID fixes de détection automatique installées dans des échelles à poissons situées sur deux axes fluviaux principaux du bassin de la Meuse belge apporte des éléments nouveaux sur :

- le flux migratoire des anguilles jaunes en migration de remontée dans la Meuse depuis Lixhe vers les secteurs fluviaux amont;
- l'axe migratoire prioritaire des anguilles jaunes en montaison dans le bassin hydrographique de la Meuse belge et ;
- la dynamique de migration des populations d'anguilles jaunes au cours de leur processus de recrutements naturels dans la Meuse en Wallonie.

Il apparaît que le flux des anguilles en montaison baisse significativement depuis l'entrée en Belgique par Lixhe vers les secteurs amont dans le réseau hydrographique de la Meuse. Le flux trop faible observé à Monsin (24.7%) sur la Meuse et plus en amont à Yvoz-Ramet (4.6%) sur la Meuse et à Angleur (3.3%) est probablement insuffisant pour peupler les affluents et les sous-affluents du bassin hydrographique de la Meuse en Belgique. Ceci permet de confirmer que l'anguille, espèce migratrice présente historiquement sur le bassin de la Meuse belge, est sans équivoque dans une situation alarmante d'un point de vue démographique à cause du niveau faible des apports fluviaux. Pour remédier à cette situation, le flux remontant devrait augmenter afin que les anguilles colonisent les secteurs plus amont jusqu'aux ruisseaux de tête du bassin de la Meuse tel que l'exige leur cycle biologique selon un phénomène de densité-dépendance (Ibbotson et al. 2002). De même, en l'état actuel du déclin populationnel des anguilles sur toute son aire de distribution, un soutien aux populations locales de la Meuse par un repeuplement raisonné pourrait s'avérer très utile pour sauver l'espèce (voir chapitre 2.3). Par ailleurs, le phénomène biologique de densité-dépendance de l'anguille pourrait expliquer la similitude observée au niveau des tailles corporelles dans les fractions migrantes d'anguilles sur les deux axes fluviaux étudiés, l'axe Meuse et l'axe Ourthe.

Les routes migratoires apparaissent très variées chez les anguilles qui colonisent le réseau hydrographique Wallon via la Meuse. Mais, d'après les résultats des tests effectués chez les anguilles relâchées, la colonisation vers les secteurs amont s'effectuerait prioritairement sur l'axe fluvial de la Meuse au détriment de l'axe fluvial de l'Ourthe. L'attractivité de l'axe Meuse serait due à son attractivité (pas besoin de bifurquer comme pour se rendre dans l'Ourthe) et à son régime thermique plus élevé. Ce qui souligne une fois de plus le rôle qu'exerce la variable environnementale température de l'eau sur le comportement de migration de l'anguille pendant sa phase de remontée des cours d'eau et de colonisation du domaine continental. C'est d'ailleurs, la température qui influencera également l'inversion d'axe migratoire prioritaire observé en faveur de l'axe Ourthe en 2014 à cause de l'hiver 2013 – 2014 très doux offrant des températures clémentes pendant une durée plus longue et donc une disponibilité accrue des températures favorables à l'activité migratoire sur cet axe fluvial plus froid que l'axe Meuse.

Les résultats des détections dans les trois stations RFID au cours des saisons des migrations 2010 – 2014 montrent que les anguilles détectées migrent vers l'amont majoritairement à travers les échelles à poissons alors qu'une fraction très minoritaire

d'anguilles a contourné la station de détection de Monsin pour n'être détectée que dans les stations en amont. Un tel comportement révèle la capacité des anguilles à remonter le fleuve par utilisation des voies alternatives aux échelles à poissons. Toutefois, au regard de la part importante d'anguilles non détectées (72.7% des 1273 anguilles marquées relâchées), l'utilisation de ces voies de contournement (canaux, écluses, canal Albert) aux stations de détection installées dans les échelles à poissons nécessite d'être élucidée moyennant des études appropriées de biotélémétrie acoustique. Par ailleurs, les fréquences très élevées de détections multiples des anguilles lors de leurs passages sous le détecteur à la station de Monsin et le taux important d'anguilles position finale aval (39.8% des 314 anguilles détectées) par rapport à l'antenne de détection soulèvent la question de l'attractivité et de la franchissabilité de cet ouvrage pour les Anguilliformes reconnues comme des espèces à faible capacité de nage (Tesch 2003 ; Clough et al. 2004), ainsi que celle de la dynamique migratoire de certaines anguilles jaunes à leur arrivée à Monsin.

La montaison des anguilles a lieu surtout lors des nuits de printemps et de l'été en un ou plusieurs passages sous l'antenne de détection dans l'échelle à poissons. Certaines anguilles qualifiées de « rapides » ont été détectées dans l'année de leur relâcher parce qu'elles continuent de migrer après avoir été marquées et relâchées. La vitesse journalière de migration observée dans ce groupe d'anguilles est élevée ce qui fait qu'elles peuvent potentiellement parcourir des distances plus importantes en une saison de migration (Monsin 56 km/an ; Yvoz-Ramet 73 km/an; Angleur 33 km/an) par rapport aux distances observées dans d'autres rivières européennes (20-30 km/an, Aprahamian 1988). Par contre, d'autres anguilles appelées anguilles « lentes » ne sont détectées qu'à partir de la saison de migration consécutive à la saison de leur relâcher et présentent une progression annuelle lente (Monsin 4.2 km/an ; Yvoz-Ramet 6.1 km/an; Angleur 3.7 km/an), laquelle est inférieure à la gamme des distances moyennes parcourues annuellement par l'anguille dans plusieurs rivières européennes (8 – 30 km/an, Aprahamian 1988 ; Mann & Blackburn 1991). La progression lente chez ces anguilles serait due au fait que ces anguilles alterneraient des périodes de migration et d'alimentation lors de leur colonisation vers les secteurs amont. Selon Owen (2001), la séparation des phases de croissance et de migration serait indispensable chez cette espèce à cause du coût énergétique de la digestion s'opposant à l'expression de l'activité locomotrice. Il serait fort probable également que le phénomène de densité-dépendance de l'espèce (Ibbotson et al. 2002) ait contribué dans la prise de la décision tardive d'émigrer pour ce groupe d'anguilles. Plusieurs auteurs mentionnent que le comportement migrateur chez l'anguille peut s'exprimer jusqu'à un stade de croissance avancé (Lobón-Cerviá et al. 1995 ; White & Knights 1997). Ceci traduit qu'il ne doit pas être étonnant d'observer la migration des anguilles de grande taille comme le cas dans cette étude. D'ailleurs, plus la distance par rapport à la mer est importante, plus les anguilles migrantes sont de grande taille. De même, le fait que les anguilles rapides soient significativement plus grandes que les anguilles lentes, pourrait signifier que les réserves énergétiques ou les capacités physiques des anguilles influencent l'activité migratoire. D'ailleurs, les petites anguilles auraient tendance à rechercher les zones à faibles écoulements alors que les grandes anguilles n'hésiteraient pas à emprunter les zones centrales où le courant est plus important (Tesch 2003). La vitesse de migration des anguilles corrèle significativement avec la taille des anguilles. Selon Clough et al. (2004), il y a une amélioration générale des performances de nage chez les anguilles lorsque la taille

corporelle s'accroît. Cette situation pourrait expliquer la détection observée tôt au cours de la saison de migration chez les anguilles de grande taille corporelle

Par ailleurs, la détection pendant plusieurs années de certains individus dans le réseau fluvial de l'étude suggère que certaines anguilles marquées et relâchées à Lixhe, résident plusieurs années dans le réseau hydrographique de la Meuse où elles effectuent plusieurs changements des secteurs fluviaux de vie avant leur échappement définitif vers la mer. D'autres anguilles ne sont détectées que plusieurs années après avoir été relâchées, montrent que ces anguilles pourraient cesser de migrer en faveur de la phase d'alimentation avant de reprendre cette activité migratrice au cours de saisons qui suivent leur relâcher. Ces deux comportements des anguilles offrent l'opportunité de mieux comprendre la biologie des anguilles dans la Meuse.

L'important recouvrement des tailles entre les anguilles détectées et les anguilles relâchées révèle l'efficacité de la technique des stations fixes de détection RFID automatique utilisée, laquelle s'avère peu ou pas sélective vis-à-vis de la taille des anguilles jaunes. De même, les résultats obtenus de la méthodologie d'échantillonnage utilisée (stations RFID fixes de détection installées dans les échelles à poissons) ne montrent aucune contradiction avec la biologie de l'anguille. Tout comme, le taux de détection de 27.3% observé apparaît très élevé par rapport aux taux de recapture de 1 à 15% généralement reportées dans des études de capture – marquage – recapture des anguilles (Naismith & Knights 1988; White & Knights 1997 ; Simon & Dörner 2014). Cette méthodologie s'avère donc très fiable et parfaitement adaptée à l'étude de la dynamique de migration des anguilles jaunes chez cette espèce de poisson à instinct cryptique dans un milieu fluvial éloigné de la zone tidale comme la Meuse belge. Dans ce contexte et de manière à élucider la dynamique de colonisation des secteurs fluviaux amont (les affluents et les sous-affluents de la Meuse) par les anguilles jaunes de même que l'évaluation de l'incidence des obstacles physiques parsemés sur les parcours, l'évaluation de l'efficacité des échelles à poissons installées et l'évaluation de l'utilisation des voies alternatives de migration, il importerait d'étendre le réseau des stations RFID fixes de détection automatique sur l'ensemble du bassin hydrographiques de la Meuse en Wallonie couplé à un suivi par biotéléométrie.

**ACTION 2. PIEGEAGE DANS LES ECHELLES A POISSONS, MARQUAGE ET SUIVI DES  
MIGRATIONS, SUIVI DES REPEUPEMENTS**

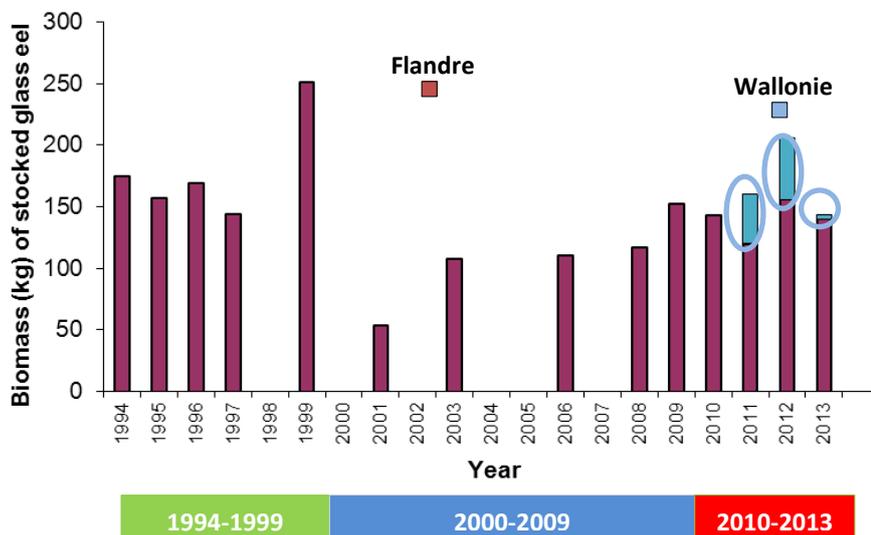
**2.3. ESSAIS DE REPEUPEMENTS EN CIVELLES IMPORTEES**

### 2.3.1. Introduction

Le repeuplement est l'une des mesures identifiées dans le Règlement Anguille (CE N°1100/2007) de l'Union Européenne pour stopper la grave régression démographique de l'anguille et reconstituer le stock de cette espèce (UE, 2007). Ce règlement oblige chaque état membre de l'Union Européenne à mettre en place un plan de gestion de l'anguille. Il stipule également que si un Etat membre autorise la pêche d'anguilles d'une longueur inférieure à 12 cm, il doit réserver 60% des captures d'anguilles de moins de 12 cm à des opérations de repeuplement dans les eaux intérieures. L'objectif ultime de cette mesure de gestion est d'augmenter le taux d'échappement vers la mer des anguilles argentées. L'objectif pour chaque bassin hydrographique est fixé à au moins 40% de la biomasse des anguilles argentées par rapport à la biomasse estimée avant régression démographique de l'espèce.

Le repeuplement en anguilles est une pratique courante dans de nombreux pays européens. Il est réalisé généralement avec des civelles et parfois avec des anguillettes. Cette pratique très ancienne est déjà connue en Allemagne dès le début du 20<sup>ème</sup> siècle et plus tard dans le reste de l'Europe. En Belgique plus précisément en Wallonie, le début du repeuplement date des années des captures importantes des civelles en Région flamande. Celles-ci datent de la fin des années 1960 jusqu'à la fin des années 1970 (Philippart et al. 2010). En Europe, la plupart des actions de repeuplement ont été réalisées dans des lacs, des marais ou des réservoirs mais très rarement dans les cours d'eau. Ceci s'explique probablement par le fait que les rivières sont des milieux ouverts qui rendent les anguilles difficilement recapturables.

En Région Wallonne, les statistiques de la Commission provinciale de Liège du Fonds piscicole renseignent que la Meuse liégeoise, la Dérivation et le canal Albert ont bénéficié d'importants repeuplements en civelles (au total 740 kg, soit 2 056 300 civelles d'un poids moyen de 0.36g) de 1967 à 1981. Tout récemment encore à l'initiative du Service de la Pêche, la Meuse, ses affluents et sous-affluents ont bénéficié des déversements directs en civelles importées de la France et du Royaume Uni. La figure 1 présente les repeuplements en civelles en Belgique et en Wallonie en 1994-2013 et illustre une opération de déversement direct en civelles importées dans la Méhaigne un affluent direct de la Meuse en 2011.



**Belgique:** repeuplements en civelles importées, 1994-2013 (C. Belpaire et al.2013)



**Wallonie:** repeuplements en civelles importées dans la Méhaigne

**Figure 1.** Repeuplements en civelles en Belgique et en Wallonie de 1994 à 2013 et déversement direct des civelles importées dans la Méhaigne, un affluent direct de la Meuse liégeoise en Région Wallonne en Belgique en 2011.

Ces repeuplements ont été réalisés dans des milieux profonds parfois canalisés comme la Meuse et ses affluents. Ces types de milieux posent un sérieux problème de la réalisation des suivis scientifiques d'évaluation de l'efficacité du repeuplement. En Wallonie comme d'ailleurs dans toute l'Europe, il y a très peu des données sur l'efficacité

biologique et économique de la pratique du repeuplement. La survie, la croissance, la dispersion, l'utilisation de l'habitat, le sexe-ratio et la qualité des géniteurs obtenus après une opération de repeuplement demeurent encore peu connus (Simon *et al.* 2013 ; Simon & Dörner 2014). Pourtant, cette connaissance s'avère très utile pour améliorer l'application de la technique du repeuplement, évaluer ses bénéfices et coordonner efficacement la technique comme une mesure de conservation et de restauration de l'espèce.

Dans cette étude, des civelles d'anguilles européennes sauvages originaires d'un estuaire du Royaume Uni ont été déversées en mai 2013 dans trois rivières de typologies différentes dans le Sud de la Belgique. Ces rivières sont de petites tailles et présentent des capacités d'accueil actuellement sous-utilisées par les anguilles à cause du déclin de la colonisation observé ces dernières années. Ces types de rivières offrent la possibilité de réaliser des suivis scientifiques soutenus par pêches électriques avec le plus d'efficacité. L'objectif de cette étude est tout d'abord de tester si le repeuplement en rivière avec des civelles importées est potentiellement efficace et pourrait constituer une solution concrète à plus large échelle comme mesure de conservation afin de pallier au déclin de l'espèce. La réponse à cette question nécessite la réalisation d'une étude de survie, croissance et dispersion des individus dans les milieux où ils ont été réintroduits. En effet, un repeuplement efficace en civelles devrait se caractériser par un bon taux de survie et une croissance suffisante des recrues. Ce qui nécessite un milieu favorable au développement des jeunes anguilles. Or le milieu lotique utilisé dans cette étude présente des conditions très différentes des conditions du milieu estuarien, milieu naturel des civelles. Il est donc légitime de se demander si la survie ou l'utilisation de l'espace par des individus ne s'en trouveront pas affectées. Notre choix s'est porté sur trois rivières typologiquement différentes afin d'augmenter la diversité des habitats potentiellement utilisables et d'affiner la précision de nos résultats.

Cette étude a également pour objectif d'améliorer les connaissances en termes de biologie et de préférences d'habitats de l'anguille européenne au stade d'anguillette. En effet, si la biologie et l'habitat des stades anguilles jaunes et argentées sont assez largement étudiés, le stade anguillette est encore très méconnu. Or l'enjeu est important puisque mieux connaître ce stade très utilisé pour les opérations de repeuplement permet d'en améliorer les techniques et d'augmenter leur efficacité.

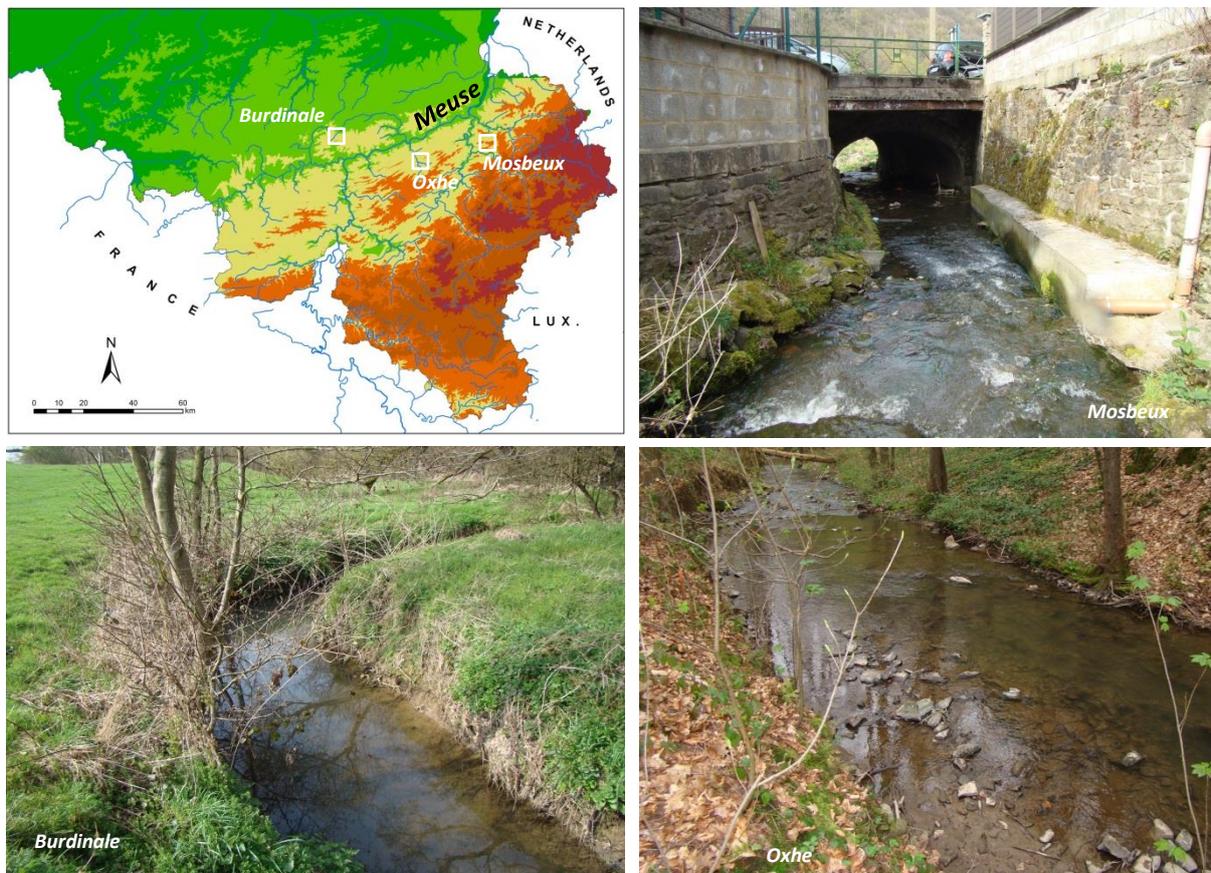
## **2.3.2. Méthodologie**

### **2.3.2.1. Milieux d'étude**

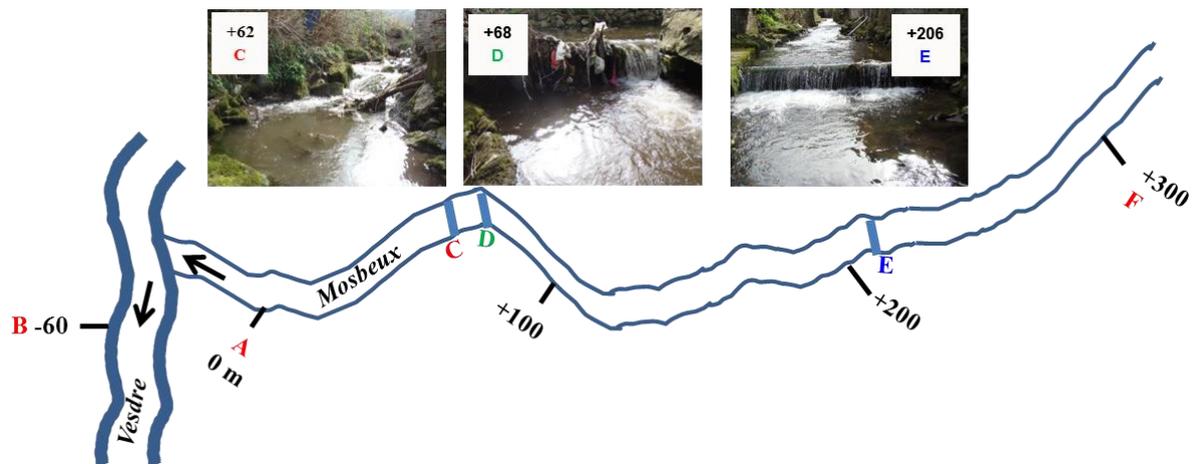
Les trois rivières cibles sélectionnées sont le ruisseau d'Oxhe, le Ry de Mosbeux et la Burdinale. Elles se situent en Région Wallonne dans le bassin de la Meuse en Belgique (fig. 2). Ces cours d'eau sont de petites tailles et permettent ainsi la réalisation des suivis scientifiques soutenus avec le plus d'efficacité possible. Ces rivières ont par le passé abrité des populations d'anguilles résidentes (Philippart & Vranken 1982). Elles présentent des caractéristiques géomorphologiques et hydrobiologiques variables.

Les secteurs de référence étudiés ont une longueur de 400 m de long (200 m en

amont et aval du point de déversement des civelles) dans l'Oxhe et la Burdinale. Dans le Mosbeux, ce secteur n'est que de 260 m (200 m en amont du point de déversement des civelles et 60 m en aval) dû au fait que le point de déversement est situé à 40 m de sa confluence avec la Vesdre. Ce point a été choisi sur la base de son accessibilité lors des campagnes des pêches électriques. Le Mosbeux se distingue des deux autres rivières par la présence de deux petits obstacles physiques. Le premier obstacle est situé à +62 m (différence de niveaux d'eau  $77\pm 14$  cm) par rapport au point de déversement des civelles et le second à +68 m (différence de niveaux d'eau  $95\pm 5$  cm) (fig. 3). Ces deux obstacles sont considérés comme franchissables par les civelles selon la méthode ICE (Baudoin et al. 2014). Le secteur étudié dans le Mosbeux croise également une zone d'habitations équipée de nombreux ponts.



**Figure 2.** Carte de localisation des trois rivières cibles dans la région wallonne en Belgique et leurs illustrations. A) Ry de Mosbeux (affluent de la Vesdre) ; B) Burdinale (affluent de la Méhaigne) ; C) Ruisseau d'Oxhe (affluent direct de la Meuse hutoise)



**Figure 3.** Présentation des obstacles physiques sur le secteur de référence (-60 à +200) dans le Ry de Mosbeux. A = point de déversement des civelles. Différence des niveaux d'eau aux obstacles: C =  $77 \pm 14$  cm, D =  $95 \pm 5$  cm et E =  $83 \pm 5,6$  cm.

La biodiversité des poissons dans les sites d'étude (Tableau 1) varie entre  $n = 2$  (Oxhe) espèces et  $n = 7$  espèces (Mosbeux), avec le chabot *Cottus rhenanus* comme espèce la plus abondante dans les trois rivières. L'anguille européenne n'a pas été trouvée dans le tronçon de référence du ruisseau d'Oxhe. En revanche, des individus anguilles résidentes de 55-75 cm ont été capturés dans la Burdinale (densité, 0,005 anguilles / m) et le Mosbeux (0,02 anguilles / m). Considérant l'importance des petites anguilles dans le régime alimentaire de nombreux prédateurs comme la truite de rivière *Salmo trutta* (Kennedy & Fitzmaurice 1971) et le brochet *Esox lucius* (Mann 1982), la densité de ces deux espèces ont été évaluées sur les sites d'étude (Tableau 1).

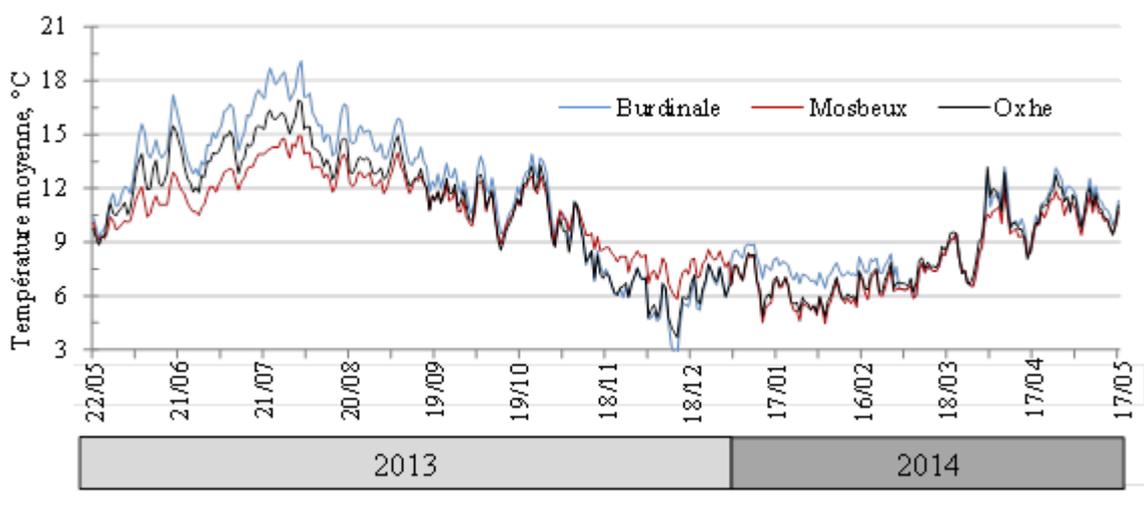
La disponibilité des micro-habitats (substrat de fond, couverture, profondeur d'eau et vitesse du courant) a été estimée sur les sites de référence balisés et divisés en secteurs adjacents de 12,5 m de long. Ces estimations sur les micro-habitats ont eu lieu en conditions de faible régime hydraulique avant les campagnes de pêches électriques. Le substrat a été déterminé par utilisation de l'échelle granulométrique de Wentworth (Malavoi & Souchon 2002) qui apporte des informations importantes tant pour les aspects morphodynamiques comme la rugosité du lit que biologiques comme par exemple la notion d'habitat, de refuge et d'abri hydraulique. Cette échelle a montré que le tronçon de référence était principalement composé de sables, de limons et de matières organiques fines (diamètre  $< 0,05$  cm) dans la Burdinale (Tableau 1). Il est constitué des pierres fines (diamètre 6-13 cm) et grossières (13-26 cm) dans l'Oxhe et, des pierres grossières (13-26 cm) et des blocs (26-102 cm) dans le Mosbeux. La couverture des

secteurs étudiés a été évaluée par identification des zones couvertes (présence de ripisylves, plantes aquatiques et ponts) et des zones non couvertes. Elle a montré que la Burdinale était plus recouverte par une végétation riveraine que les deux autres rivières. La mesure de la profondeur d'eau (en cm) a révélé une forte ressemblance entre les trois cours d'eau. La vitesse du courant d'eau (en m/s) a été mesurée à 3 cm de la surface à l'aide d'un courantomètre (modèle Flo-Matc 2000, Marsh-McBirney INC). Elle montre que la Burdinale possède un écoulement relativement plus faible que l'Oxhe et le Mosbeux.

La température de l'eau a été enregistrée en continu. Des enregistreurs thermiques de type Onset® ont été placés dans les trois rivières étudiées. Les données thermiques analysées portent sur une période allant du déversement des civelles (le 22 mai 2013) à la date de la fin de cette étude (le 17 mai 2014), soit une durée maximale de 361 jours. Le régime thermique de l'eau était très proche entre les trois rivières en termes de température moyenne quotidienne (Mosbeux 9,8 °C ; Oxhe 10,1 °C et ; Burdinale 10,4 °C) et de sa variation journalière (maximum 5,1 °C dans le Mosbeux ; 5,5 °C dans l'Oxhe et 4,9 °C dans la Burdinale, au printemps le 17 avril 2014) (fig. 4). Une température >8°C est considérée comme le seuil utile à l'activité des civelles (Dekker 1998 ; Gascuel 1986 ; Linton et al. 2007) et des anguillettes (Kvidsten 1983 ; McGovern & McCarthy 1992). La durée des périodes avec des températures au-dessus de ce seuil s'est avérée être relativement plus longue dans le Mosbeux (263 jours sur une durée expérimentale totale de 361 jours ; température moyenne quotidienne de 11,1 °C) que dans la Burdinale (250 jours ; 12,7 °C) et l'Oxhe (239 jours ; 12 °C).

**Tableau 1.** Brève description des trois rivières cibles, du point de déversement, de l'ichtyofaune et des dates des campagnes des pêches électriques de recensement dans les secteurs de référence. L'ichtyofaune comprend : le chabot *Cottus rhenanus*, la truite de rivière *Salmo trutta*, la loche franche *Barbatula barbatula*, l'anguille européenne *Anguilla anguilla*, l'épinoche *Gasterosteus aculeatus*, le vairon *Phoxinus phoxinus*, le smolt *Salmo salar*, la lamproie de Planer *Lampetra planeri* et le brochet *Esox Lucius*. \* $p < 0,05$ , KW and U tests.

Description	Burdinale	Oxhe	Mosbeux
<b>Rivière</b>			
Affluent direct	Mehaigne	Meuse	Vesdre
Distance de la mer du nord, (km)	388,8	377	359,3
Longueur de la rivière, (km)	12	12	7
Longueur du secteur de référence, (km)	0,4	0,4	0,26
Substrat prédominant, (% du secteur)	Sables fins, limons et matières organiques (91%)	Pierres fines et grossières (73%)	Pierres grossières et blocs (60%)
Largeur en m: moyenne (min-max)	2,5 (1,6–3,5)	3,9* (2,4–6,5)	2,7 (1,8–7,4)
Couverture en %: moyenne (min-max)	80* (40–90)	30 (5–60)	33 (0–85)
Profondeur en cm: moyenne (min-max)	17,6 (1–60)	19,3 (2–65)	15,2 (2,5–65)
Débit en m/s: moyenne (min-max)	0,2 (0–0,9)	0,3 (0–1,4)	0,3 (0–1,3)
<b>Point de déversement des civelles, 2013</b>			
Altitude, (m)	130	160	97
Distance de la Meuse, (km)	12,8	7,0	17,0
Distance de la confluence, (km)	3,5	7,0	0,04
Nombre de civelles déversées, (kg)	6232 (1,5 kg)	6232 (1,5 kg)	4155 (1,0 kg)
<b>Communauté des poissons</b>			
Espèces, (par ordre décroissant d'abondance)	Chabot, épinoche, loche, anguille, petite lamproie et brochet	Chabot et truite de rivière	Chabot, truite de rivière, loche, anguille, épinoche, vairon et smolt
Truite de rivière 2–40 cm, (densité, n/m)	-	0,33	0,32
Anguilles résidentes 55–75 cm, (densité, n/m)	0,005	-	0,02
<b>Campagnes des pêches électriques</b>			
<b>2013</b>	12 septembre, 3 et 10 octobre	10 septembre, 15 et 30 octobre	18 et 29 octobre
<b>2014</b>			
Capture – marquage	1 avril	4 avril	31 mars
Recapture	8 avril	11 avril	7 avril



**Figure 4.** Conditions des températures moyennes journalières en secteurs de référence des trois cours d'eau pendant la durée de l'étude (2013 – 2014).

### 2.3.2.2. Déversement des civelles importées

Les civelles déversées (moyenne  $\pm$  écart type : taille,  $70 \pm 3,5$  mm et poids,  $0,26 \pm 0,07$  g,  $n = 50$ ) ont été prélevées dans un estuaire du Royaume-Uni (UK Glass Eels Ltd, Gloucester). Elles ont été transportées par avion, réceptionnées par l'Université de Liège et déversées dans les trois rivières pilotes dès leur arrivée en Belgique le 22 mai 2013 (fig. 5). Les déversements ont eu lieu en un point unique appelé « point 0 ». Ce point était choisi sur la base de l'accessibilité du lieu lors des campagnes des pêches électriques de recensement. La Burdinale et l'Oxhe ont été repeuplées chacune avec 1,5 kg de civelles ( $n = 6232$  individus). Le Mosbeux a reçu 1 kg de civelles ( $n = 4155$  individus). Au total, une biomasse totale de 4 kg de civelles ( $n = 16\ 619$  individus) ont été déversées dans les trois rivières.



**Figure 5.** Le 22/05/2013, réception et déballage des civelles; échantillonnage, comptage et biométrie et ; dispersion par nage active après une courte acclimatation lors du déversement en rivière (c).

### 2.3.2.3. Méthodes de monitoring

Pour évaluer l'efficacité de déversement direct en civelles réalisé dans les trois rivières cibles, nous avons évalué la survie, la croissance, la dispersion et l'utilisation de l'habitat chez les anguillettes capturées au cours des campagnes des pêches électriques (Groupe EFKO, 3 kVA). Ces campagnes de recensement ont eu lieu en 2013 (septembre et octobre) et 2014 (mars et avril). Ces pêches ont été effectuées en un seul passage sur des secteurs de référence balisés tous les 12,5m. L'effort de pêche (nombre d'anodes et d'épuisettes de 2 mm x 2 mm employées) était fourni proportionnellement à la largeur du cours d'eau prospecté (Fig. 6). Pour les rivières les moins larges comme le Mosbeux et la Burdinale, les

pêches réalisées comptaient une personne à l'anode, deux personnes aux épuisettes, une personne au bassin de transport et une personne aux câbles. En revanche, dans l'Oxhe la rivière la plus large, le nombre d'anodes a été doublé. Les anguillettes ont été capturées à l'épuisette, anesthésiées (Eugénol 0,3ml/l d'eau), dénombrées, mesurées ( $\pm 1$  mm), pesées ( $\pm 0,1$ g) et relâchées à leurs points de capture.

Les pêches électriques de 2014 ont aussi permis d'estimer les stocks des populations restaurées d'anguilles grâce à l'utilisation de la technique de capture, marquage et recapture. Deux campagnes de pêches électriques ont été exécutées. La première campagne de pêche électrique appelée la pêche de capture – marquage, avait pour objectif de capturer les anguillettes et de les marquer par injection d'élastomères de couleur (VIE – Visible Implant Elastomer ; Northwest Marine Technology Inc., Shaw Island, WA, USA). Elle a permis de déterminer le nombre d'individus capturés et marqués (M). Le marquage VIE est une technique préalablement testée et adaptée aux anguilles de petite taille (Imbert et al 2007). Ce type de marquage permet de distinguer des individus marqués de ceux non marqués lors de la pêche de recapture. La seconde campagne de pêche électrique nommée la pêche de recapture visait la recapture des individus marqués. Elle a eu lieu 7 jours après la campagne de marquage VIE (Fig. 7). C'est au cours de cette campagne de pêche que le nombre d'anguillettes capturées (C) et le nombre d'individus marqués capturés à nouveau (R) ont été comptés.

Le nombre d'individus restaurés dans les populations d'anguilles (N) et l'intervalle de confiance à 95% (IC) ont été estimés en utilisant les formules améliorées de Petersen (Chapman 1951 ; MacNamara & McCarthy 2014). Ces formules apparaissent les plus robustes dans le cas de petits échantillons de poissons marqués réintroduits dans la population et de délai entre la capture et la recapture permettant un mélange des individus marqués à l'ensemble de la population. Le choix de ce modèle est également justifié par l'absence d'un deuxième marquage et d'une troisième pêche électrique. Ceci aurait permis l'application des modèles plus adaptés aux milieux ouverts. Les formules utilisées sont reprises ci-dessous :

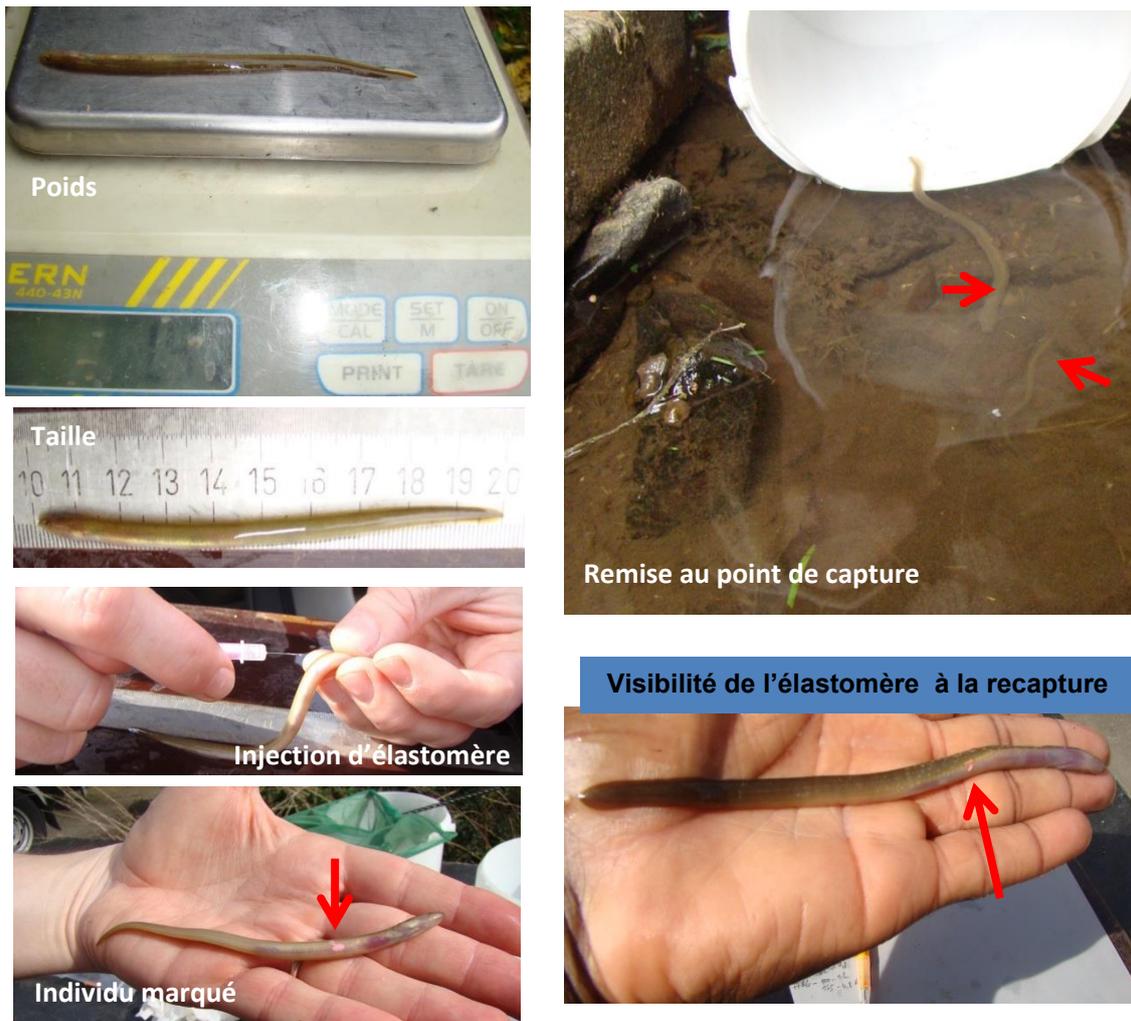
$$N = ((M+1) \times (C+1) / (R+1)) - 1$$

$$IC\ 95\% = N \pm (1.96 \times \sqrt{\frac{[(M+1) \times (C+1) \times (M-R) \times (C-R)]}{[(R+1)^2 \times (R+2)]}})$$

La comparaison de la taille des populations restaurées d'anguilles dans les trois rivières a été effectuée en utilisant le test de probabilité exacte de Fisher (FEP-test).



**Figure 6.** Protocole de pêche électrique de recensement dans les secteurs de référence de nos rivières cibles. Une anode en rivière peu large (Mosbeux et Burdinale) contre deux anodes en rivière plus large (Oxhe).



**Figure 7.** Prise de poids et taille des individus capturés, marquage par injection d'élastomère de couleur avant remise à l'eau des anguillettes marquées et, visibilité d'élastomère 7 jours après le marquage.

- La croissance des anguillettes a été étudiée en termes de :
- relation entre la longueur totale (Lt en cm) des anguillettes et leur poids corporel (P en g) calculée par l'équation du type exponentiel  $P = a Lt^b$  et par transformation logarithmique en relation de type linéaire  $\log P = \log a + b \log Lt$  où a et b sont des coefficients caractéristiques du milieu et de l'espèce ;
  - distribution des fréquences des longueurs et ;
  - indice de longueur (LI) défini comme la longueur totale de l'anguillette divisée par la longueur totale maximale des anguillettes dans la distribution des fréquences des longueurs totales des anguillettes capturées.

Pour la dispersion spatiale, chaque capture d'anguillette a été accompagnée par une identification de la distance longitudinale (en m) du point de capture par rapport au point de déversement des civelles le point 0 (amont, aval, site de déversement). Une localisation du point de capture a été également faite par rapport aux rives (rive gauche, rive droite, milieu de la rivière). La dispersion a été étudiée en termes de :

- proportion d'anguillettes pour chaque type de positionnement du point de capture (dispersion) dans la fraction totale d'individus capturés et,
- relation entre la croissance (en LI) et chaque type de dispersion longitudinale (amont-aval) ou de dispersion latérale (rive gauche, rive droite, milieu de la rivière).

L'étude de l'utilisation du micro-habitat a consisté à établir pour chaque capture, une relation entre la présence de l'anguillette et les caractéristiques physiques précises de son point de capture en termes de couverture, substrat de fond, profondeur d'eau et vitesse du courant. Pour chaque caractéristique physique, l'utilisation des micro-habitats a été examinée en termes de :

- taux d'utilisation (UR) défini comme étant la proportion d'anguillettes pour une caractéristique physique spécifique de l'habitat ;
- d'indice de préférence (PI) défini comme l'UR divisé par la disponibilité (en proportion) de la même caractéristique physique de l'habitat dans le tronçon de référence et ;
- croissance (en LI) en relation avec la caractéristique physique spécifique de l'habitat exploité.

Pour chaque type de dispersion et d'habitat exploité, les indices LI moyens des anguillettes ont été calculés. Ces indices ont été comparés entre eux en utilisant le test de Kruskal-Wallis (KW-test) suivi si cela était nécessaire par le test de Mann-Whitney (U-test).

### 2.3.3. Résultats

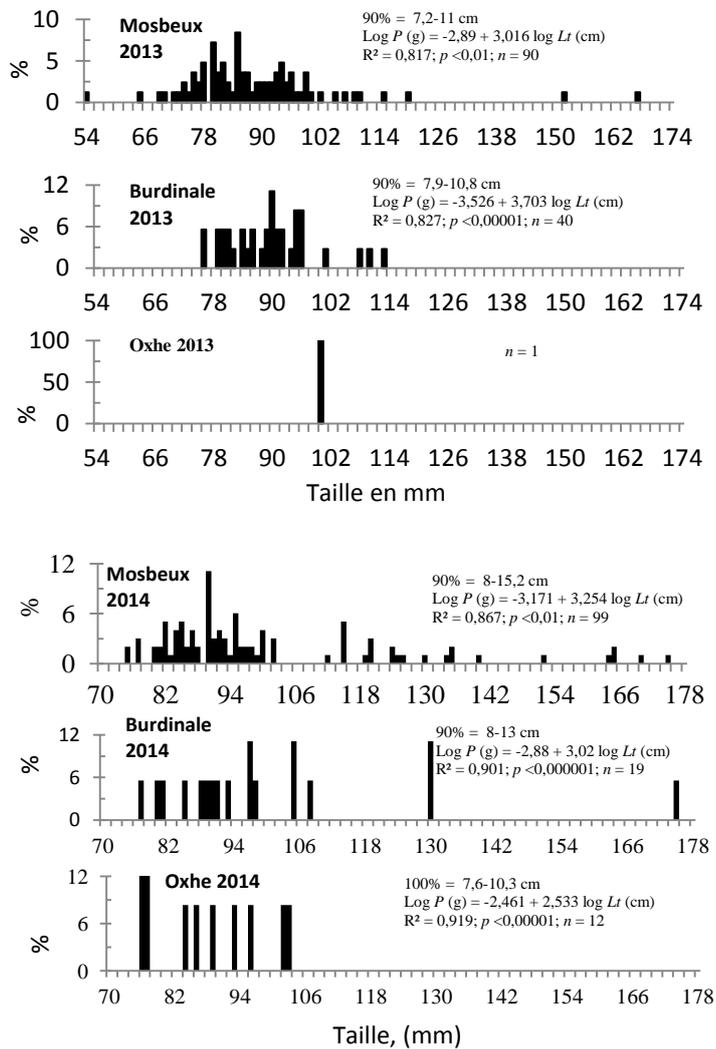
#### 2.3.3.1. Bilans des campagnes des pêches électriques et croissance des anguillettes

Les résultats des pêches électriques de recensement de 2013 – 2014 montrent que les nombres de jeunes anguilles capturées varient entre 0 et 76 anguillettes en fonction du jour de pêche, de la progression longitudinale sur le tronçon de référence et de la rivière recensée (tableau 2). Les meilleures performances de captures des anguillettes ont été obtenues dans le Mosbeux. Dans cette rivière, le nombre annuel d'individus capturés est au moins 2 à 3 fois significativement plus élevé (FEP-test,  $p < 0.05$ ) que celui d'individus capturés dans les 2 autres rivières réunies.

Pour la croissance, la distribution des fréquences des tailles des anguillettes montre une variabilité entre individus au sein d'une même rivière (Fig. 8 & 9). Le gain moyen de la taille des individus est estimé à 2 – 3 cm annuellement. La relation entre la longueur totale des anguillettes et leur poids de type  $\log P = \log a + b \log Lt$  a été analysée en 2013 et 2014. Elle révèle que les pentes des droites de régression (coefficient  $b$ ) et les ordonnées à l'origine (coefficient  $a$ ) diffèrent significativement ( $p < 0,01$ ) entre les trois rivières. Au printemps 2014, l'Oxhe montre un coefficient  $b$  inférieur à 3 indiquant chez les anguillettes une croissance allométrique minorante. En revanche, la croissance des anguillettes est isométrique ( $b = 3.02$ ) dans la Burdinale et allométrique majorante dans le Mosbeux. Ceci pourrait traduire que le facteur de condition  $K$  défini par le rapport entre le poids et la taille des anguillettes ( $K = P / Lt^b$ ) serait différent entre les rivières.

**Tableau 2. Bilans des campagnes des pêches électriques de recensement 2013 – 2014 dans les trois cours d'eau.**

Campagnes de recensement	Secteur de Pêche, (m)	Nombre d'anguillettes capturées		
		Mosbeux	Burdinale	Oxhe
<b>2013</b>				
10 septembre	-200 à +200	-	-	0
12 septembre	0 à +75	-	9	-
3 octobre	-200 à +100	-	29	-
10 octobre	+100 à +200	-	2	-
15 octobre	-200 à +200	-	-	0
18 octobre	-60 à +50	76	-	-
25 octobre	-200 à +200	-	-	1
29 octobre	+51 à +100	14	-	-
30 octobre	0 à +200	-	-	0
<b>Nombre total</b>		<b>90</b>	<b>40</b>	<b>1</b>
<b>Longueur totale, mm: moy±SD (min-max)</b>		<b>88,7±15,8 (54-167)</b>	<b>89,7±8,9 (76-113)</b>	<b>100 (100-100)</b>
<b>Poids, g : moy±SD (min-max)</b>		<b>1,1±1 (0,3-7,5)</b>	<b>1,1±0,4 (0,5-2,3)</b>	<b>1,4 (1,4-1,4)</b>
<b>2014</b>				
<b>Pêche de capture-marquage VIE</b>				
31 mars	-60 à +200	25	-	-
1 avril	-200 à +200	-	8	-
4 avril	-200 à +200	-	-	4
<b>Pêche de recapture</b>				
7 avril	-60 à +200	74	-	-
8 avril	-200 à +200	-	11	-
11 avril	-200 à +200	-	-	8
<b>Nombre total</b>		<b>99</b>	<b>19</b>	<b>12</b>
<b>Longueur totale, mm: moy±SD (min-max)</b>		<b>100,4±16,7 (75-175)</b>	<b>100,2±16 (77-175)</b>	<b>86,3±8,6 (76-103)</b>
<b>Poids, g : moy±SD (min-max)</b>		<b>1,6±1 (0,3-9,7)</b>	<b>1,7±0,9 (0,5-6,9)</b>	<b>0,8±0,2 (0,5-1,3)</b>



**Figure 8.** Fréquences relatives (en %) des classes de tailles (intervalle 2 mm) des anguillettes capturées dans les trois rivières cibles en 2013 – 2014.



**Figure 9.** Variabilité morphologique des anguilletes capturées lors des campagnes des pêches électriques en 2013 – 2014.

### 2.3.3.2. Taille de la population d'anguilles restaurées

Le nombre total d'anguilletes capturées et marquées lors de la première campagne de pêche est égal à  $n = 37$  anguilletes dans les trois rivières cibles en 2014. Pendant la

seconde campagne de pêche, c'est n = 93 individus qui ont été capturés dont n = 7 individus marqués récapturés). L'application du modèle amélioré de Petersen permet d'estimer la taille totale de la population restaurée à 446 individus dans l'ensemble des secteurs de références des trois rivières (soit une densité de 0.199 jeunes anguilles/m<sup>2</sup>), ce qui représente 2.7% du stock des civelles déversées (Tableau 3). Le niveau de succès de ce déversement diffère d'une rivière à l'autre. Le Mosbeux présente des performances de restauration en populations d'anguilles significativement plus élevées (FEP-test, p < 0.0001) que celles obtenues dans les deux autres rivières. Les performances de restauration en anguilles les plus faibles ont été observées dans l'Oxhe.

**Tableau 3.** Nombre de civelles déversées, nombre d'anguillettes capturées et marquées lors de la première campagne de pêche électrique de capture – marquage, nombre d'anguillettes capturées et nombre d'anguillettes marquées recapturées lors de la deuxième campagne de pêche électrique de recapture et, la taille estimée des populations, leurs déviations standards (SD), leurs survies et leurs densités en secteurs de référence dans les trois rivières cibles au printemps 2014.

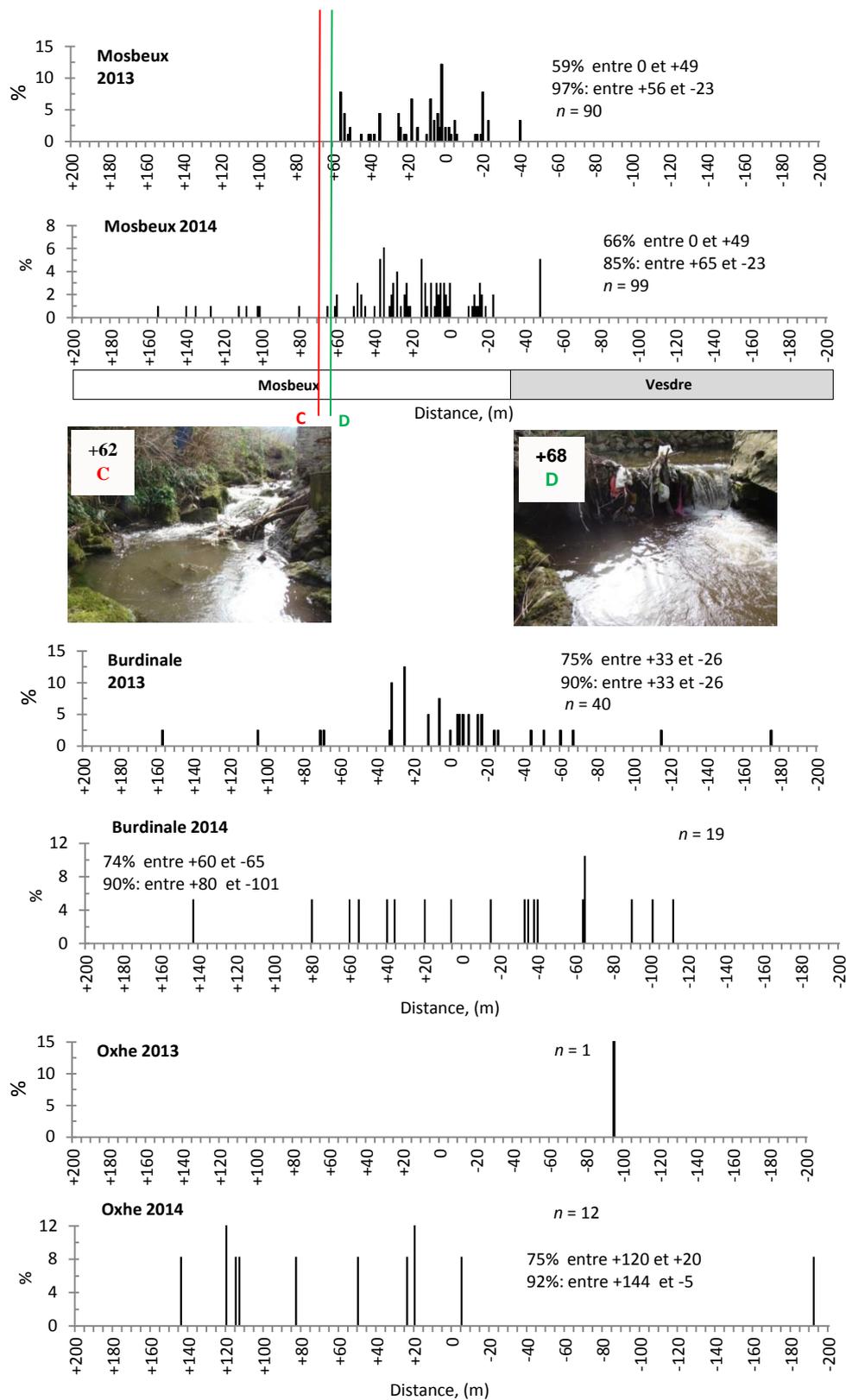
Rivière	Civelles déversées	Anguillettes capturées et marquées lors de la première campagne de pêche	Anguillettes capturées lors de la deuxième campagne de pêche	Anguillettes marquées recapturées lors de la deuxième campagne de pêche	Taille de la population (N)	Survie (%)	Densité (N/m <sup>2</sup> )	Limite < de N	Limite > de N
Mosbeux	4155	25	74	5	324	7,8	0,519	121	527
Burdinale	6232	8	11	1	53	0,9	0,055	28	78
Oxhe	6232	4	8	1	22	0,4	0,0141	13	31
Total	16619	37	93	7	446	2,7	0,1998	323	569

### 2.3.3.3. Dispersion

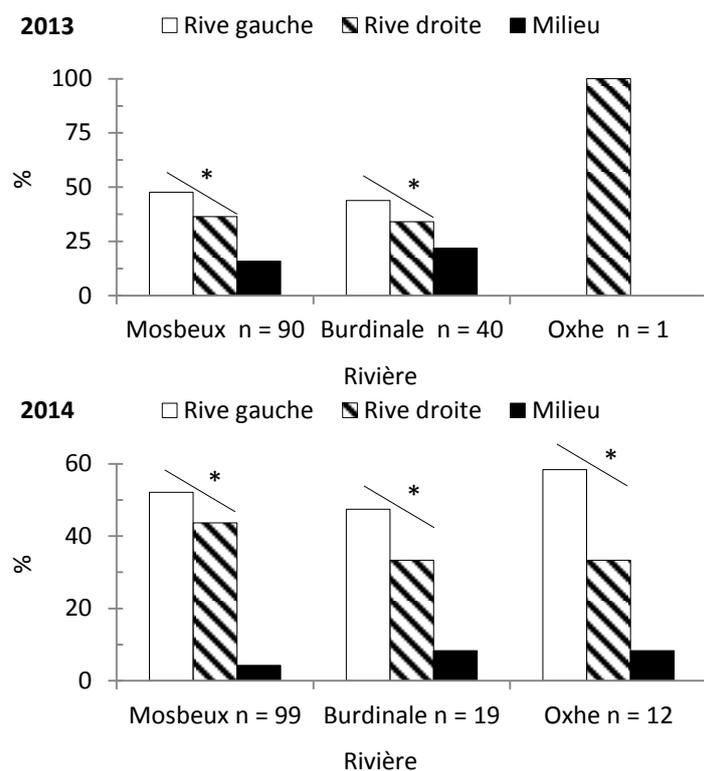
Les résultats de dispersion longitudinale des anguillettes montrent que les jeunes stades d'anguilles déversés dans un nouvel environnement se dispersent en amont et en aval par rapport au point unique de déversement (Fig. 10). Au 160<sup>ème</sup> jour après le déversement des civelles (en automne 2013), les jeunes anguilles occupent la quasi-totalité du secteur de référence dans la Burdinale. Le profil de la concentration d'anguillettes sur les tronçons de référence varie d'une rivière à l'autre.

Dans une rivière fragmentée par des obstacles comme le Mosbeux, les individus sont moins bien dispersés. La colonisation vers l'amont des anguillettes apparaît progressive et lente. Au 160<sup>ème</sup> jour après le déversement des civelles (automne 2013), 100 % des jeunes anguilles (n = 90) sont capturées dans des secteurs situés en aval de deux obstacles (obstacles C et D). Au 320<sup>ème</sup> jour (printemps 2014), 9.1 % d'anguillettes (n = 99) sont capturées au-delà des deux obstacles cités.

L'analyse de la localisation latérale (rive gauche, rive droite, milieu de la rivière) des anguillettes indique une exploitation transversale complète des rivières cibles. Toutefois, il apparaît une concentration significative des individus près des berges (FEP-test, p < 0.05) au détriment de l'intérieur des cours d'eau (Fig. 11).



**Figure 10.** Dispersion longitudinale (amont, aval) des anguillettes à partir du point de déversement dans les trois rivières wallonnes en 2013 – 2014.

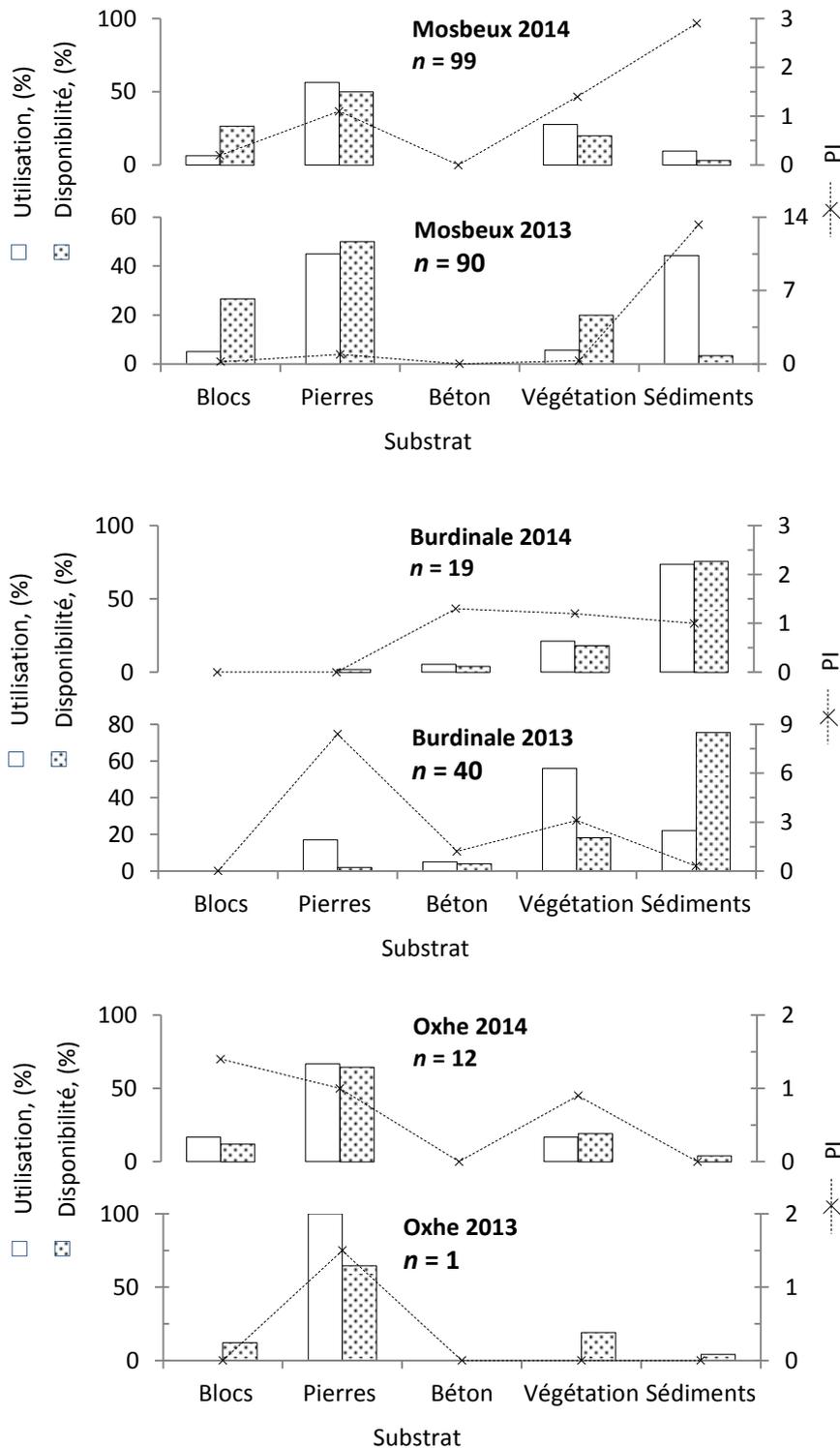


**Figure 11.** Dispersion transversale (rive gauche, rive droite, milieu de la rivière) des anguillettes dans les secteurs de référence de trois rivières en 2013 – 2014.\*  $p < 0.05$  ; FEP – test.

#### 2.3.3.4. Habitat

##### 2.3.3.4.1. Substrat

La micro-répartition des anguillettes en fonction des types des substrats de fonds révèle une exploitation nettement élevée (FEP-test,  $p < 0.05$ ) des pierres dans le ruisseau d'Oxhe et le Ry de Mosbeux et, des sédiments et de la végétation dans la Burdinale (Fig. 12). L'analyse des indices de préférence indique une préférence des anguillettes pour les substrats les plus abondants comme les pierres dans l'Oxhe (Fig. 13). Dans les deux autres rivières, la préférence des jeunes anguilles est en faveur des substrats peu abondants tels que les sédiments dans le Mosbeux et, les pierres et la semelle bétonnée du pont dans la Burdinale.



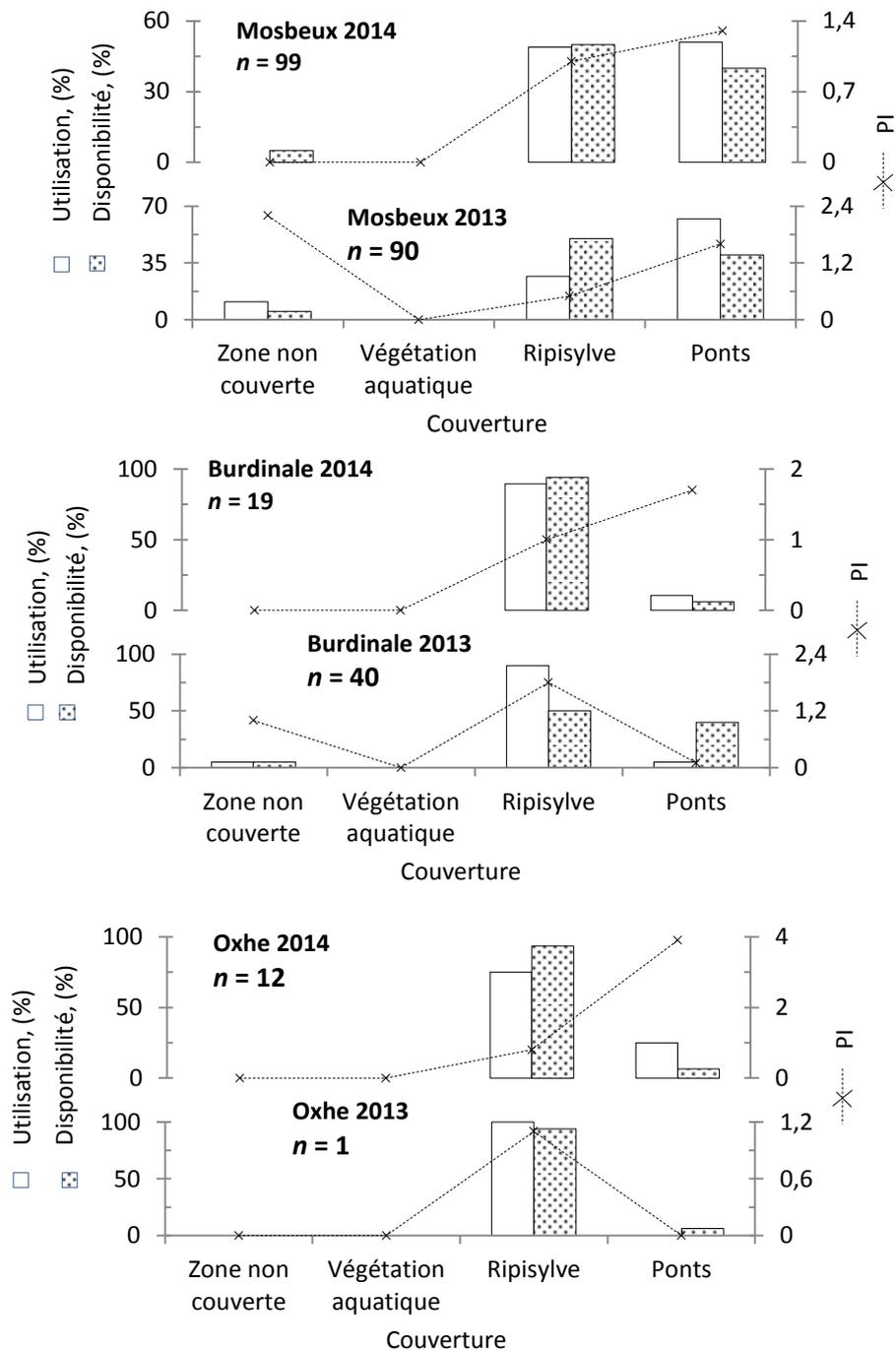
**Figure 12.** Micro-répartition des anguillettes en fonction du substrat dans les secteurs de référence de trois rivières en 2013 – 2014. Béton indique la semelle en béton des ponts. Fréquences relatives d'utilisation (%) des types de substrats par les anguillettes, disponibilité (%) en rivière des types de substrats utilisés et courbes de préférences (indice de préférence – PI) des jeunes anguilles.



**Figure 13.** Illustration des micro-habitats des captures d'anguillettes dans les secteurs de référence de trois rivières en 2013 – 2014. Flèche blanche indique l'emplacement exact de la jeune anguille.

#### 2.3.3.4.2. Couverture

La micro-répartition des anguilletes en fonction des types de couvertures montre que les anguilletes se concentrent significativement dans des zones couvertes (FEP-test,  $p < 0.05$ ) par la ripisylve et les ponts au détriment des zones non couvertes (Fig. 14). Les courbes de préférence révèlent également une préférence nette des jeunes anguilles dans les trois rivières pour les zones abritées par des ponts. Mais, ce type de zone est peu disponible, soit 1 pont routier par secteur d'étude dans l'Oxhe et la Burdinale. En revanche, le secteur de référence dans le Mosbeux croise une zone d'habitations équipée de nombreux ponts (1 pont routier + 9 passerelles) rendant ainsi disponible ce type d'habitats. Dans cette rivière, les habitats abrités par la ripisylve apparaissent aussi bien exploités par les anguilletes.

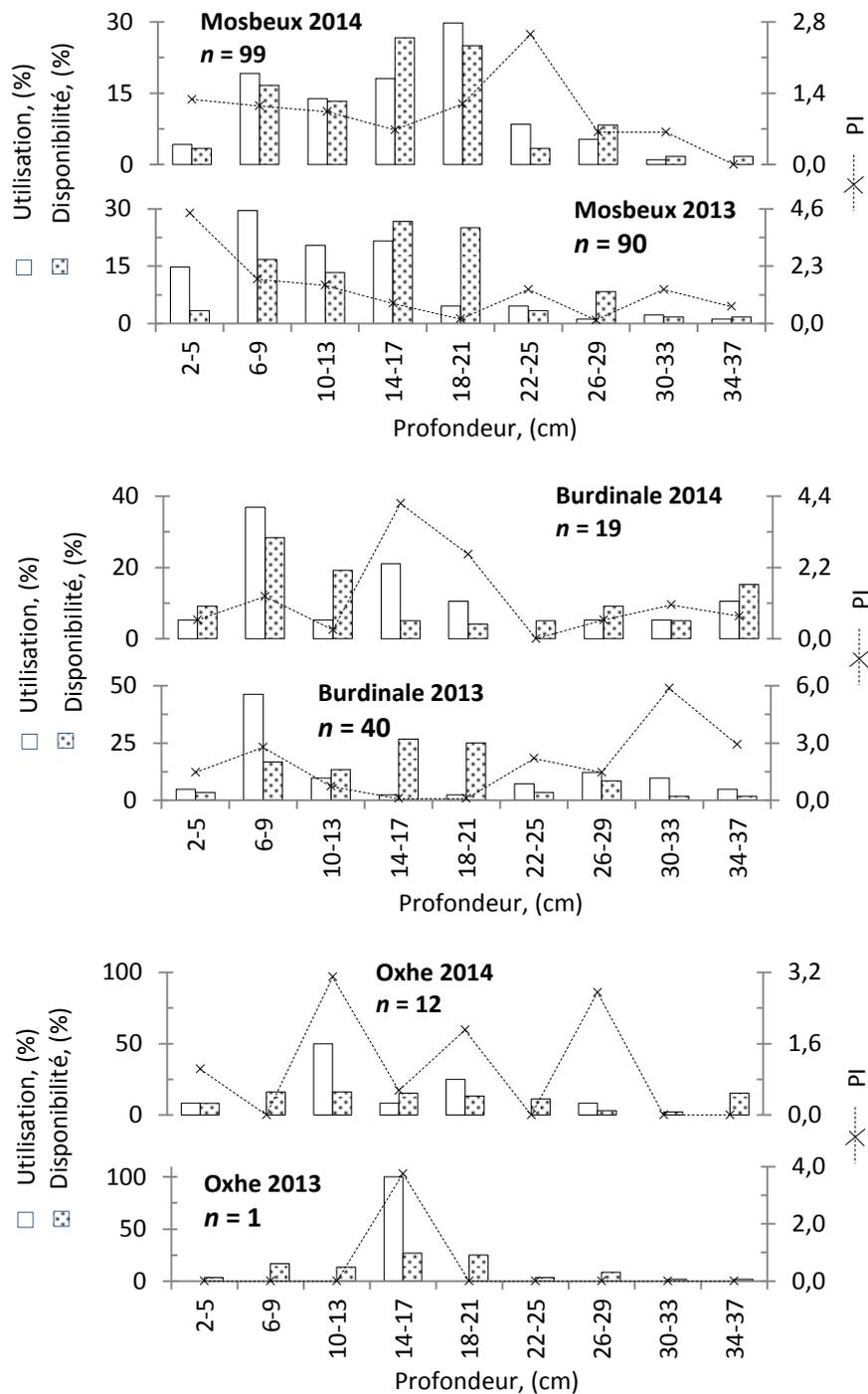


**Figure 14.** Micro-répartition des anguillettes en fonction de la couverture dans les secteurs de référence de trois rivières en 2013 – 2014. Fréquences relatives d'utilisation (%) des types de couverture par les anguillettes, disponibilité (%) en rivière des types de couvertures utilisées et courbes de préférences (indice de préférence – PI) de la jeune anguille.

### 2.3.3.4.3. Profondeur d'eau

L'analyse de la micro-répartition des anguillettes en fonction de la profondeur d'eau montre que les anguillettes se concentrent nettement (FEP-test,  $p < 0.05$ ) dans les zones peu profondes, inférieures à 22 cm (Fig. 15). L'étude des courbes de préférences indique une variabilité entre les rivières et dans le temps en ce qui concerne la profondeur préférée des jeunes anguilles. Dans le Mosbeux, une préférence pour une profondeur de 2-5 cm est

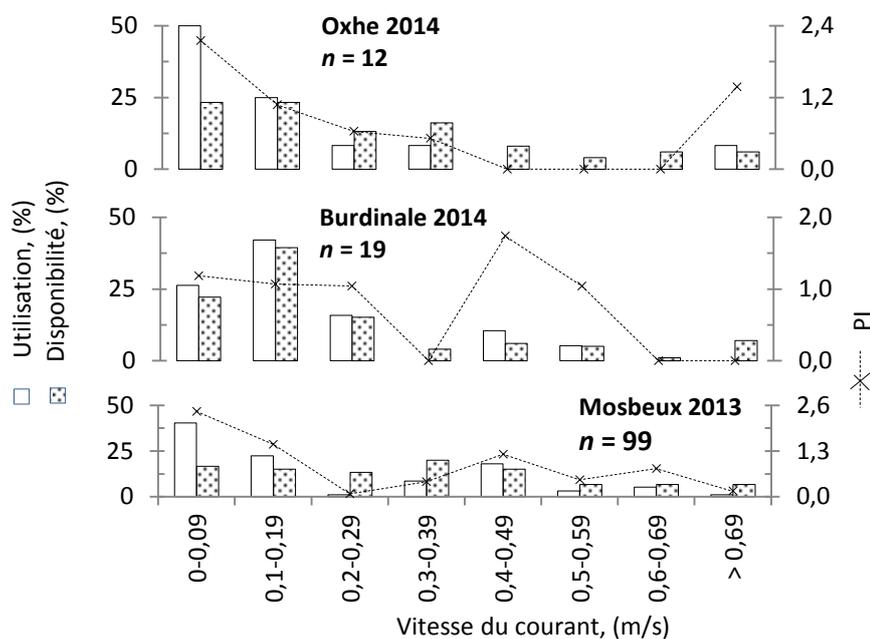
observée en 2013 contre 22-25 cm en 2014. Dans la Burdinale, les anguillettes préfèrent une profondeur située entre 30 et 33 cm en 2013 contre 14-17 cm en 2014. Dans le ruisseau d'Oxhe, cette préférence apparaît en faveur de profondeur comprise entre 14 et 17 cm en 2013 contre 10-13 cm et 26-29 en 2014.



**Figure 15.** Micro-répartition des anguillettes en fonction de la profondeur d'eau dans les secteurs de référence de trois rivières en 2013 – 2014. Fréquences relatives d'utilisation (%) des types de profondeurs par les anguillettes, disponibilité (%) des types de profondeurs utilisées et courbes de préférences (indice de préférence – PI) de la jeune anguille.

#### 2.3.3.4.4. Vitesse du courant

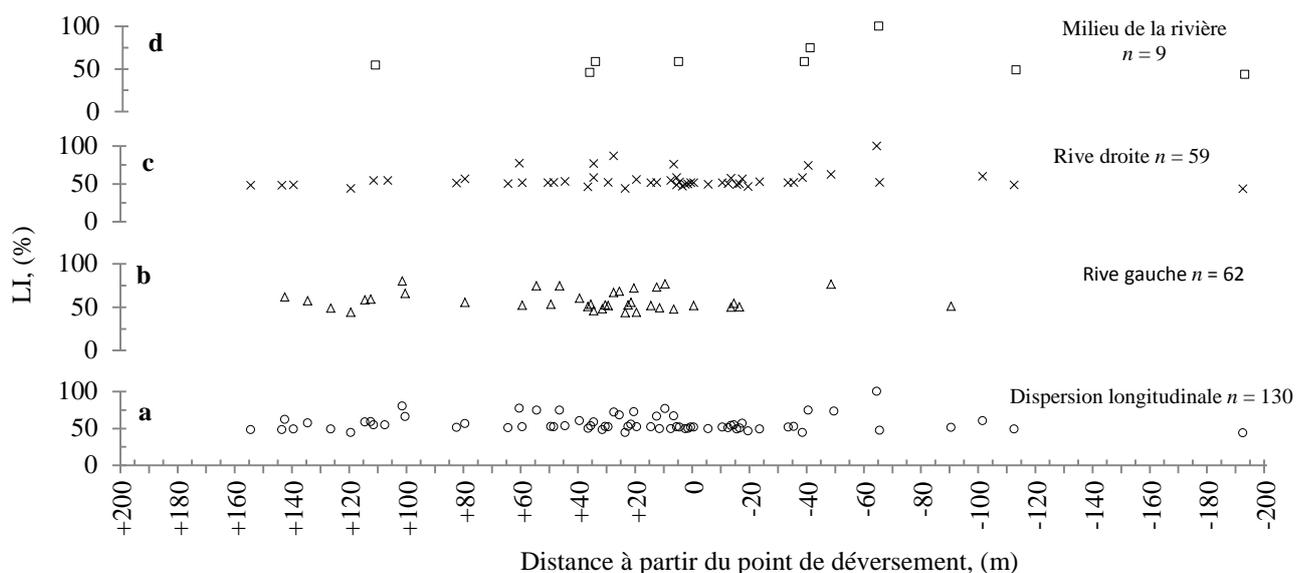
La micro-répartition des anguillettes en fonction de la vitesse du courant examinée en 2014 révèle une concentration significative (FEP-test,  $p < 0.05$ ) des anguillettes dans des zones où la vitesse du courant à 3 cm de la surface n'atteint pas 0.5 m/s (Fig. 16). Les courbes de préférence indiquent que les anguillettes se concentrent préférentiellement dans des zones où la vitesse du courant est inférieure à 0.1 m/s dans l'Oxhe et le Mosbeux. Dans ces deux rivières, ces types de zones sont disponibles. En revanche, une préférence des anguillettes pour des zones à vitesse du courant située entre 0.4 et 0.49 m/s est observée dans la Burdinale. Mais, de telles zones sont peu disponibles dans cette rivière.



**Figure 16.** Micro-répartition des anguillettes en fonction de la vitesse du courant dans les secteurs de référence de trois rivières en 2014. Fréquences relatives d'utilisation (%) des types des vitesses du courant par les anguillettes, disponibilité (%) des types de vitesses du courant utilisées et courbes de préférences (indice de préférence – PI) de la jeune anguille.

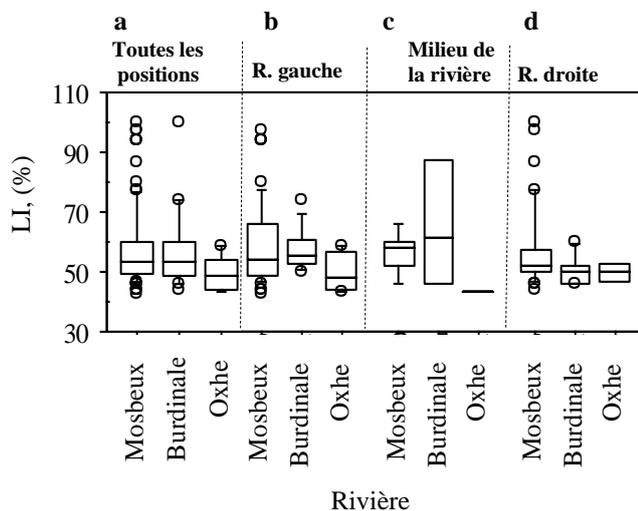
#### 2.3.3.5. Relation entre la croissance, la dispersion et l'habitat

L'analyse des données cumulées de trois rivières lors des campagnes de pêches électriques en 2014 ne montre à ce stade de l'étude aucun lien significatif (KW-test,  $p > 0.05$ ) entre d'une part la croissance des anguillettes et d'autre part la localisation des individus par rapport au profil longitudinal sur les tronçons de référence (Fig. 17). Les 9 des 99 jeunes anguilles capturées en amont de deux obstacles dans le Mosbeux ne présentaient aucun avantage significatif (U-test,  $p > 0.05$ ) de croissance par rapport aux individus capturés en aval.



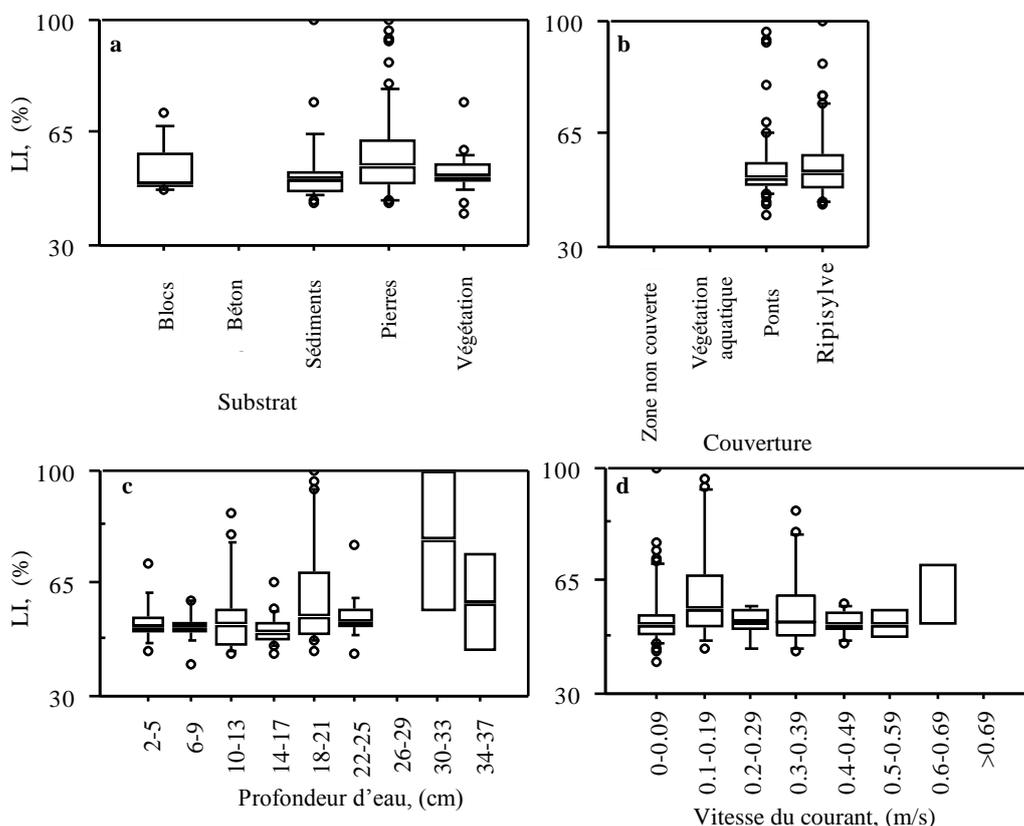
**Figure 17.** Relation entre la taille corporelle (Indice de longueur – LI, en %) des anguillettes et le profil de dispersion longitudinale (m) dans les secteurs de référence de trois rivières en 2014. Evolution moyenne de la dispersion longitudinale indépendamment de la localisation latérale (a) et dispersion longitudinale par position transversale (b, c & d).

L'exploitation d'une zone particulière (rive gauche, rive droite, milieu de la rivière) dans le profil transversal des tronçons de référence ne favorise pas de manière significative (KW-test,  $p > 0.05$ ) la croissance des jeunes anguilles (Fig. 18).



**Figure 18.** Relation entre la taille corporelle (Indice de longueur – LI, en %) des anguillettes et la dispersion latérale (rive gauche, rive droite, milieu de la rivière) dans les secteurs de référence de trois rivières en 2014. Indice de longueur indépendamment de la localisation latérale (a) et par position transversale (b, c & d).

Les caractéristiques physiques des habitats exploités par les anguillettes en termes des substrats de fond, de la couverture, de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant, ne montrent à cette étape de l'étude aucun lien significatif (KW-test,  $p > 0.05$ ) avec la croissance des jeunes stades d'anguille (Fig. 19).



**Figure 19.** Relation entre la taille corporelle (Indice de longueur – LI, en %) des anguillettes et l'utilisation de l'habitat dans les secteurs de référence de trois rivières en 2014. Indice de longueur par types de substrats exploités (a), couvertures (b), profondeurs d'eau (c) et vitesses du courant (d).

### 2.3.3.6. Analyse des performances surprenantes de survie dans le Mosbeux

Face au succès élevé de survie des anguillettes sur l'un de nos modèles écologiques que constitue le Mosbeux, deux nouvelles campagnes de pêches électriques ont été exécutées en fin 2014. La première campagne a lieu eu le 18/11/2014 sur 160 m (-60 à +100 m) et la seconde campagne, le 19/11/2014 sur 200 m (+100 à +300 m). Chacune de ces campagnes de pêches se déroulait en deux passages consécutifs.

L'enjeu de ces pêches était de procéder au marquage des jeunes recrues avec des transpondeurs d'identification à radio fréquence (RFID) qui sont des puces électroniques dotées chacune d'un code individuel (fig. 20). Ces puces fonctionnent indéfiniment car elles ne sont pas alimentées par une pile et répondent à la sollicitation énergétique d'un récepteur. Ces marques permettent un suivi durable et individualisé des anguilles. Il peut

informer à long terme sur la survie, l'activité journalière et saisonnière, le rythme circadien, la dispersion, l'exploitation de l'habitat et le comportement des jeunes recrues issues du repeuplement. Ces traits individuels pourront être reliés au sexe futur et à la qualité du géniteur produit. Une telle démarche scientifique devrait permettre de comprendre davantage certains mécanismes d'adaptation mises en œuvre par des jeunes stades d'anguille dans un nouvel environnement où ces stades sont naturellement absents.



**Figure 20.** Equipement de marquage (puce électronique) et de suivi durable (lecteur des puces, boitier électronique, détecteur des puces) des jeunes recrues d'anguilles issues du repeuplement en civelles réalisé le 22/05/2013 dans le Mosbeux.

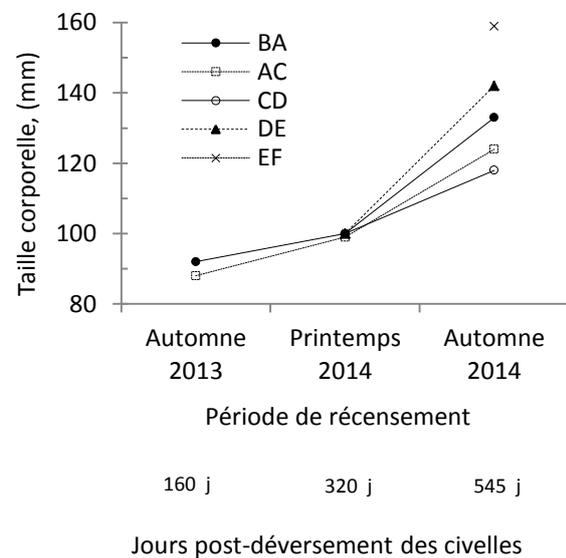
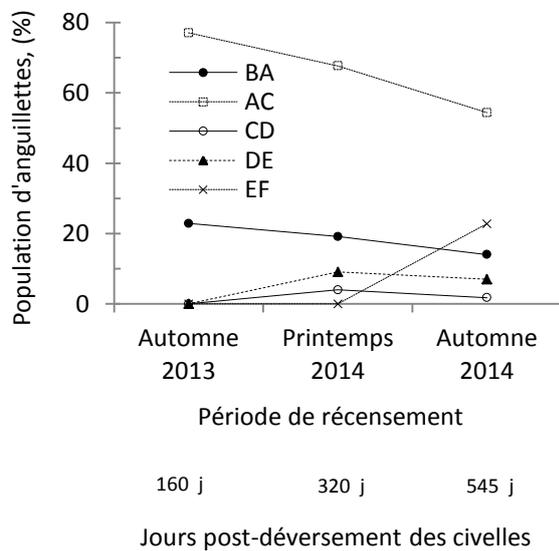
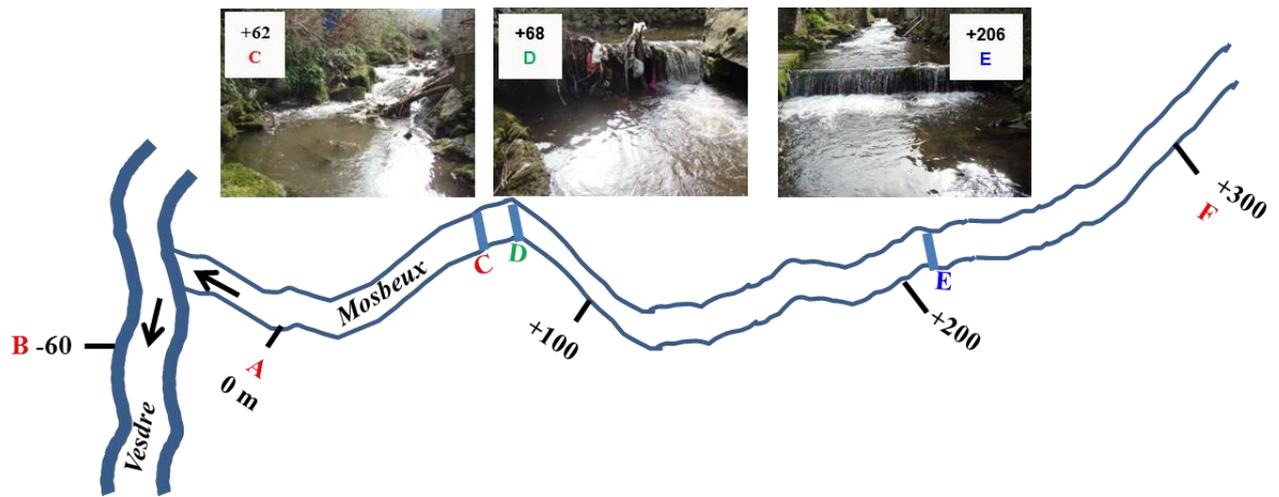
Ces récentes campagnes des pêches d'automne 2014 sont réalisées en deux passages consécutifs par campagne. Les résultats obtenus indiquent que l'efficacité de pêche définie en termes de proportions d'individus capturés par passage sur le total d'individus capturés lors de deux passages variait entre 8 % et 82 % selon le secteur de pêche et l'ordre de passage (Tableau 4). Le premier passage lors de la campagne de pêche électrique du

19/11/2014 réalisée sur les secteurs plus amont s'est révélé plus efficace (FEP-test,  $p < 0.01$ ) que le deuxième passage. En revanche, une efficacité similaire (FEP-test,  $p > 0.05$ ) entre le premier et le deuxième passage lors de la campagne de pêche électrique du 18/11/2014 réalisée sur les secteurs situés en aval. Ceci pourrait traduire qu'un nombre important d'anguillettes ne serait pas capturé au cours des pêches exécutées en un seul et unique passage.

**Tableau 4. Résultats de récentes campagnes des pêches (automne 2014) dans le Ry de Mosbeux. P1 et P2 indiquent le nombre de jeunes anguilles au premier (P1) et second (P2) passages lors des campagnes de pêches électriques de recensement.**

Date des pêches	Secteurs de pêche, (m)	Anguillettes capturées, (n) 1P+2P	Taille, (mm)		Poids, (g)	
			Moyenne±SD	Min-max	Moyenne±SD	Min-max
18/11/2014	-60 à +100	18+22 = 40	126±26	92-240	3,8±2,1	1-21
19/11/2014	+101 à +300	14+3 = 17	154±31	104-246	7,7±5,2	1,8-29,4
<b>Total</b>		<b>57</b>	<b>134±27</b>	<b>92-246</b>	<b>4,9±3,3</b>	<b>1-29,4</b>

Entre les secteurs délimités par des obstacles dans le Mosbeux, il apparaît au niveau de la population d'anguillettes une colonisation progressive vers des secteurs plus en amont et une baisse temporelle de densité intra secteur (Fig. 21 & Tableau 5). Des jeunes anguilles ne sont pas observées au-delà de deux premiers obstacles ( $C = 77 \pm 14$  cm de différence des niveaux d'eau et  $D = 95 \pm 5$  cm) qu'au printemps 2014, presque une année après le déversement des civelles. Il faut attendre en automne de la même année pour enregistrer les premiers individus au-delà du troisième obstacle ( $E = 83 \pm 6$  cm). Ceci démontre que la dynamique de dispersion vers l'amont de ces jeunes stades d'anguille fortement densité-dépendante serait probablement ralentie dans le Mosbeux par la présence d'obstacles. La croissance des anguillettes montre une hausse intra secteur dans le temps, une similitude entre secteurs jusqu'au 320<sup>ème</sup> jour après le déversement et une tendance vers la hausse en partant du point de déversement vers l'amont ou vers l'aval de la rivière.



**Figure 21.** Evolution populationnelle et de croissance dans le temps post-déversement (date du déversement - au printemps, le 22/05/2013) en intra- et inter-tronçons dans le Mosbeux. A = point de déversement des civelles. Différence des niveaux d'eau : C =  $77 \pm 14$  cm, D =  $95 \pm 5$  cm et E =  $83 \pm 5,6$  cm.

**Tableau 5.** Evolution populationnelle et de croissance dans le temps post-déversement (date du déversement - le 22/05/2013) en intra- et inter-secteurs dans le Mosbeux.

Longueur, (m)		Tronçons de rivière									
		BA, (60 m)		AC, (62 m)		CD, (6 m)		DE, (138 m)		EF, (94 m)	
Age post-déversement, (jours)	N total	N, (%)	Lt, mm	N, %	Lt, (mm)	N, (%)	Lt, (mm)	N, (%)	Lt, (mm)	N, (%)	Lt, (mm)
160 j	90	22,9	92	77,1	88	-	-	-	-	-	-
320 j	99	19,2	100	67,7	99	4,0	100	9,1	100	-	-
545 j	57	14,0	133	54,4	124	1,8	118	7,0	142	22,8	159

#### 2.3.4. Discussion

D'après les résultats des tests effectués, cette étude démontre que la technique de déversement direct des civelles en rivières est une piste crédible et sérieuse pour augmenter la population d'anguilles dans les hydrosystèmes continentaux. Cette technique est plus économique et moins contraignante par rapport à la pratique de repeuplement réalisée avec des jeunes anguilles acclimatées en élevage, ce qui corrobore des études récentes qui ont suggéré que l'acclimatation des civelles en captivité n'offre aucun avantage de survie, de croissance et d'adaptation en milieu naturel (Simon *et al.* 2013 ; Simon & Dörner 2014). , une Notre étude démontre que la démarche du repeuplement en rivière exige au préalable un choix judicieux des types de cours d'eau. La priorité devrait être accordée aux rivières avec une grande capacité d'accueil et une disponibilité accrue et diversifiée des habitats favorables aux civelles/anguillettes d'un point de vue bioénergétique (coût énergétique faible pour lutter contre le courant), efficacité maximale des prises alimentaires et abris potentiels de protection contre des oiseaux piscivores et d'autres prédateurs comme des poissons conspécifiques inter cohortes (cannibalisme) et des poissons hétérosécifiques (truite, brochet et autres prédateurs) (Kennedy & Fitzmaurice 1971 ; Philippart 1989 ; Jessop 2000 ; Mann 2002 ; Źydelis & Kontautas 2008).

La recherche constante des conditions optimales de vie chez les jeunes anguilles justifierait leur concentration dans des micro-habitats comme les sédiments, les chevelus racinaires et les crevasses entre les pierres ou les blocs qui permettent un bon enfouissement des individus. Ces micro-habitats sont définis comme des habitats préférés des anguillettes. Ils sont principalement situés près des rives couvertes par la ripisylve ou les ponts et où la hauteur d'eau et la vitesse du courant sont particulièrement faibles. La différence entre les trois rivières étudiées en ce qui concerne la disponibilité de micro-habitats aux caractéristiques physiques évoquées favorables aux anguillettes, fait toute la différence dans les niveaux de recrutement observés entre ces cours d'eau. Le Mosbeux est plus attractif que les deux autres rivières d'un point de vue de la disponibilité et de la diversité des micro-habitats (rivière fragmentée, nombreux ponts, substrats variés, effluents organiques d'origine domestique). Il présente le nombre le plus élevé des jeunes recrues d'anguilles. En terme de densité dans les tronçons de référence, le Mosbeux se situerait dans les limites supérieures des estimations réalisées dans de nombreuses rivières européennes (Carss *et al.* 1999 ; Ibbotson *et al.* 2002 ; Chadwick *et al.* 2007). En revanche, l'Oxhe le ruisseau le plus froid offrant peu de conditions favorables à la vie des anguillettes dans le secteur de référence présente un taux de survie le plus faible et une croissance allométrique qui indique que les anguillettes croissent plus en longueur qu'en poids. Compte tenu des exigences très importantes des jeunes anguilles en micro-habitats, il serait probablement intéressant d'un point de vue pratique d'opérer le déversement direct des civelles par étalement le long des berges pour favoriser un accès plus rapide aux abris de protection avec le moins d'efforts possibles.

De par la pénibilité des captures des anguillettes due à leur petite taille (Simon *et al.* 2013) et leur instinct cryptique (Bardonnnet *et al.* 2005), les estimations effectuées des taux de recrutements devraient être considérées comme des valeurs minimales. Ces taux de recrutements n'ont été évalués qu'avec des résultats obtenus des pêches électriques réalisées sur des secteurs de référence. L'idée de considérer ces taux de recrutement

comme minimum est également soutenue par la capture des jeunes anguilles bien au-delà des secteurs de référence lors des campagnes de pêches électriques de prospection réalisées en secteurs élargis (Tableau 6). Cela n'est d'ailleurs pas surprenant parce que notre milieu d'étude est constitué de rivières qui ne sont que des milieux très ouverts. Ces types de milieux sont caractérisés par une dynamique de dispersion très intense. La dispersion des anguillettes vers l'amont et l'aval s'opère activement par la nage des poissons ou passivement via les crues. Il est même fort probable aux regards de la vitesse journalière de migration à ces stades de vie de l'anguille (White & Knights 1997 ; Pedersen 2009) que quelques individus aient quitté les secteurs étudiés en seulement un jour.

**Tableau 6. Bilans des campagnes des pêches électriques de prospection en secteurs élargis dans les trois cours d'eau.**

Rivière	Dates de pêche	Secteurs, (m)	Anguillettes, (n)	Taille (mm) moy±SD (min-max)	Poids (g) moy±SD (min-max)	Dispersion (m) (min-max)
Mosbeux	22/04/2014	+200 à +500	0	-	-	-
	19/11/2014	+200 à +300	13	158±32.7 (92-110)	8±5,4 (2,1-29,4)	+260 à +300
Burdinale	24/04/2014	+200 à +400	1	105 (105-105)	1,4 (1,4-1,4)	-263 à -376
	20/05/2014	-200 à -400	5	105±5.2 (92-110)	1,6±0.5 (0,9-2,2)	-263 à -376
Oxhe	22/05/2014	+200 à +400	0	-	-	-
	21/05/2014	-200 à -400	0	-	-	-
	18/06/2014	Hermalle sous Huy	1	130	4	-6000

Par ailleurs, les performances de croissance observées pendant la première année chez les anguillettes issues de repeuplement en civelles apparaissent comparables aux performances de croissance observées dans des milieux comme des lacs et rivières eutrophes en Europe (Bisgaard & Pedersen 1991 ; Pedersen 2000). A ce stade de l'étude, aucun lien significatif n'a été décelé entre la croissance et l'exploitation d'un habitat particulier ou la localisation longitudinale ou transversale spécifique. L'âge encore très jeune des poissons et le nombre trop faible d'individus capturés pourraient en être la principale explication. La taille faible des échantillons d'anguillettes limiterait significativement la puissance de certains tests d'hypothèses. Néanmoins, la taille similaire observée entre les anguilles ayant franchis les deux obstacles dans le Mosbeux et les anguilles situées en aval de ces obstacles laisse penser que le franchissement de tels obstacles à ce stade de vie de l'anguille serait une performance sous l'influence principalement de la densité dépendance de l'espèce plutôt que d'un simple effet de statut énergétique particulier.

Aux regards de la typologie particulière de Mosbeux, son succès élevé de recrutements et sa proximité des habitations, ce type de milieu peut s'avérer intéressant pour une étude durable de la dynamique de migration de l'anguille repeuplée dans un nouvel environnement. Une telle étude pourrait s'étaler depuis le stade de colonisation de la jeune anguille à celui de l'échappement de l'individu mature en passant par l'étape

intermédiaire de sédentarisation du poisson adulte. Cette approche scientifique devrait aider pour un milieu écologique spécifique à mieux quantifier des actions futures de déversement dans le but d'atteindre les objectifs de l'Europe d'un point de vue du taux d'échappement vers la mer en anguilles argentées pour chaque bassin hydrographique. Dans ce contexte, il importerait d'apporter des précisions sur certains mécanismes d'adaptation de l'anguille issue du repeuplement en ce qui concerne l'activité saisonnière ou journalière, la croissance, le comportement, le sexe futur, la maturité, la qualité du géniteur produit et, tenter de relier ces traits biologiques entre eux.

### **ACTION 3 : DENOMBREMENT DES POPULATIONS EN RIVIERES**

Cette action a été réalisée mais elle est confondue avec les recherches effectuées dans les actions 1 et 2.

**ACTION 4 : TRAITEMENTS DE DONNEES ANNUELLES, ANALYSE DES RESULTATS ET REDACTION D'ARTICLES SCIENTIFIQUES**

D'un point de vue de la vulgarisation des résultats de cette étude, nous pouvons mentionner comme actions menées :

- **Participation aux conférences scientifiques :**

1. « Evolution de la biodiversité piscicole en Wallonie des années 1970 à nos jours », une présentation orale de Mr. J.C. Philippart avec une thématique sur les anguilles au colloque international sur les Apports scientifiques récents à la Gestion des Peuplements de Poissons et de leurs Habitats, 30 mai 2013 à Liège en Belgique.
2. « L'efficacité des repeuplements de restauration. V. Le cas des civelles d'anguille européenne », une présentation orale de B. Nzau Matondo à la journée d'étude 2013 en gestion piscicole et halieutique organisée par la Maison Wallonne de la pêche du 05 novembre 2013 à Wépion en Belgique.
3. «How migration process works: the case of wild European yellow eel in the regulated Belgian Meuse river basin», un poster présenté par B. Nzau Matondo au colloque international LIFE WALPHY du 15 au 17 octobre 2013 à Namur en Belgique.
4. « Arrival of European eel in Belgian part of the Meuse: who and how are they ? », une présentation orale de B. Nzau Matondo au 10th Symposium International sur l'éco hydraulique du 23 au 27 juin à Trondheim en Norvège.
5. « Does yellow eel prefer old pool and weir or new vertical slot fish pass during their upstream migration? », accepté comme présentation orale de B. Nzau Matondo au Fish Passage 2015 with double session on upstream and downstream passage of anguilliform morphotypes (eel and lamprey) du 22 au 24 juin à Groningen aux Pays-Bas.

- **Publications scientifiques:**

1. « 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* (2013) 47: 291–301.» article de Ovidio M., Seredynski A.L., Philippart J.C. & Nzau Matondo B., présente les préférences d'habitat et les aires d'activité des anguilles résidentes suivies par radio-pistage.
2. « Arrival of European eel in Belgian part of the Meuse: who and how are they? 2014. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Ecohydraulics, Trondheim, Norway. <http://hdl.handle.net/2268/170392> » Nzau Matondo B., Philippart J.C., Dierckx A., Benitez J.P. & Ovidio M., présente l'estimation du stock des anguilles entrant en Belgique en 2013, leur identité morphologique et leur dynamique de migration.
3. « Country Report Belgium 2013 on the eel stock and fishery » de Mr. Claude Belpaire, il s'agit ici de notre collaboration scientifique dans l'élaboration de ce rapport.
4. « Country Report Belgium 2014 on the eel stock and fishery » de Mr. Claude Belpaire, il s'agit ici de notre collaboration scientifique dans l'élaboration de ce rapport.

- **Articles scientifiques soumis:**

1. « Using fish-passes to assess entering stock and migration dynamics of European eel in the Belgian river Meuse », article 2015 soumis à la revue *River Research and Applications*, décrit en profondeur la dynamique migratoire des anguilles à leur entrée en Belgique.
2. « European glass eel stocking efficiency in three typologically different small Belgian streams », article 2015 soumis à la revue *Aquatic Living Resources*, présente les performances de restauration des populations des anguilles par le repeuplement en civelles en fonction des modèles écologiques.

**- Articles scientifiques en finalisation**

1. « Stock evolution and ecological characteristics of migrating European yellow eels in the River Meuse during the last 20 years », détaille l'évolution du stock depuis 1992 et les changements biologiques et écologiques identifiés.
2. « Migration dynamic of individual European yellow eels in the regulated Belgian River Meuse », fait une analyse fine (cinétique, flux, morphologie des individus, utilisation des échelles) du processus de colonisation des secteurs fluviaux en amont de la frontière de la Belgique avec les Pays-Bas.
3. « Does yellow eel prefer old pool and weir or new vertical slot fish pass during their upstream migration? », précise la préférence des anguilles migrantes en ce qui concerne la configuration de l'échelle à poissons et décrit le comportement de fidélité des anguilles à leurs routes de migration.

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

Au terme de ce projet FEP, nous pouvons affirmer que nous avons atteint tous les objectifs initialement fixés. Nous connaissons désormais avec précision le niveau du déclin des recrutements fluviaux des anguilles en Wallonie et les principaux changements biologiques intervenus dans les populations migrantes des anguilles. Nous avons quantifié le flux migratoire des anguilles qui colonisent la Wallonie, leurs contributions potentielles au stock des géniteurs panmictiques, leurs routes de migration prioritaires lors de la colonisation des secteurs fluviaux en amont ainsi que leurs patrons et cinétiques de migration. Nous avons une bonne connaissance des conditions d'application du repeuplement en civelles pour un meilleur recrutement en jeunes anguilles, une pratique potentiellement efficace pour augmenter les populations locales des anguilles dans les cours d'eau.

Comme recommandations pratiques liées aux thématiques de recherches abordées et directement bénéfiques pour les populations d'anguilles et de leur migration dans le réseau hydrographique de la Wallonie, nous préconisons :

### a) un soutien aux populations locales d'anguilles par :

- la réalisation d'actions de repeuplements réfléchis avec des civelles sur la base des résultats préliminaires des tests réalisés dans le cadre du présent projet d'étude.
- la Meuse liégeoise et le Canal Albert ainsi que leurs annexes fluviales forment un important habitat de résidence et de croissance des anguilles qui peut être compte tenu des superficies concernées utilisé lors des repeuplements pour augmenter les populations d'anguilles. Cette mesure de gestion évoquée pour la Meuse liégeoise devrait aussi s'appliquer au cours principal de l'Ourthe liégeoise ainsi qu'à l'Amblève et à la Vesdre.
- l'utilisation pour les repeuplements des modèles écologiques constitués par de petits affluents et sous-affluents de la Meuse (Méhaigne, Burdinale, Berwinne, Gueule, ruisseau des Awirs) ainsi que les sous-affluents de l'Ourthe (Ry de Mosbeux) bien connectés à la Meuse avec des habitats offrant de bonnes potentialités de survie et de croissance et des possibilités de réaliser des suivis scientifiques précis, est à encourager.
- des cours d'eau typiquement salmonicoles comme le Ruisseau d'Oxhe offrant peu de potentialités de développement pour l'anguille nécessitent des aménagements spécifiques de l'habitat physique pour cette espèce. Mais, compte tenu de l'abondance d'habitats de survie et de croissance actuellement sous-utilisés par les anguilles dans de nombreux cours d'eau en Wallonie, les aménagements des habitats d'anguilles dans les rivières salmonicoles ne doivent pas être une priorité.
- l'amélioration de la qualité de l'eau (pollution chimique d'origine domestique et agricole) doit être poursuivie pour le renforcement de la capacité d'accueil en anguilles dans certains cours d'eau.

L'application des mesures de repeuplement implique la mise en place de certaines actions comme la création d'une base wallonne des données de repeuplement (rivière, lieu, coordonnées GPS, quantité des juvéniles déversées, date), l'établissement d'un fichier d'identification individuelle des anguilles recrutées à partir des repeuplements et la réalisation d'un suivi en rivières des recrues. Cette approche permettra de mieux évaluer les

bénéfiques de la pratique de repeuplement d'un point de vue de la qualité biologique des individus produits et de la conservation de l'espèce dans nos cours d'eau.

b) un soutien à la migration vers l'amont des anguilles par :

- bien que nos résultats montrent que les anguilles sont capables d'utiliser les échelles à bassins modernes installées en Meuse, il est envisageable d'améliorer le confort des anguilles lors de leur transit dans les échelles à poissons par installation de substrats et d'abris appropriés à cette espèce à l'instinct cryptique.
- la poursuite des efforts de rétablissement de la libre circulation des poissons dans les affluents et sous affluents de la Meuse en prenant en considération l'anguille européenne comme espèce prioritaire.
- le bon réglage des vannes d'alimentation de l'échelle à poissons de Monsin pour obtenir une vitesse de courant non rédhibitoire pour les anguilles qui font souvent demi-tour dans l'échelle après avoir franchis tous les bassins successifs.

D'autres actions comme la poursuite du contrôle du flux d'anguilles entrant en Wallonie et le suivi de la migration des anguilles vers les secteurs fluviaux plus amont doivent être pérennisées. Le contrôle du flux d'anguilles doit se poursuivre par une surveillance régulière de l'ancienne échelle à poissons de Lixhe pour conserver la continuité des données de remontée depuis 1992. Les données de capture de Lixhe peuvent être également améliorées par aménagement d'abris-pièges amovibles et spécifiques aux anguilles dans la cage-piège de la nouvelle échelle à poissons. Le suivi de la migration des anguilles vers l'amont doit continuer et s'étendre à l'ensemble du bassin hydrographique de la Meuse belge grâce à l'application d'une méthodologie impliquant des stations fixes de détection RFID qui se sont avérées très fiables dans un grand fleuve comme la Meuse. Cette stratégie devrait permettre de suivre régulièrement l'état du stock des populations des anguilles et donc de mieux coordonner les mesures de conservation et de restauration.

c) Perspectives de recherches :

Comme pistes de recherches pour améliorer notre connaissance biologique des populations d'anguilles en Wallonie, nous avons mentionné au niveau de chaque chapitre, des éléments qui nécessitent encore d'être élucidés. Il serait très intéressant de continuer cette étude vers les pistes de recherche que nous avons suggérées dans les différents chapitres. Au regard de la relation directe entre l'âge, le sexe, la longévité dans nos rivières avant l'échappement vers la mer et la fécondité absolue des femelles, une priorité devrait être accordée à l'étude des structures par âges et sexes des anguilles migrantes en Wallonie. De même, compte tenu de l'objectif fixé par l'Europe en ce qui concerne le taux précis d'échappement des géniteurs vers la mer à atteindre pour chaque bassin hydrographique, il s'avère indispensable de compléter les données du flux migratoire d'anguilles colonisant la Wallonie via Lixhe par une étude de quantification de la tranche migratoire d'anguilles remontant en Wallonie par les écluses de Lanaye situées en aval de Lixhe puis par le canal Albert jusqu'à la Meuse à Liège. La connaissance de ces deux flux migratoires d'anguilles et l'application du taux annuel de déclin des populations d'anguilles permettraient une modélisation objective pour parvenir au niveau du stock des anguilles jaunes correspondant à celui existant avant la mise en œuvre des facteurs de la grave régression démographique de l'espèce et donc, grâce à la connaissance des taux d'argenture des populations d'anguilles

jaunes en montaison, obtenir la contribution potentielle de la Meuse belge au stock des géniteurs panmictiques sans influence des facteurs de régression des populations d'anguilles. Par ailleurs, le repeuplement en civelles a un impact direct sur la population d'anguilles, l'avenir des recrues devrait constituer une préoccupation scientifique majeure moyennant des études de dynamique de survie, de croissance et d'utilisation des habitats via l'usage de nouvelles technologies de marquage et de suivi.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Als T.D., Hansen M.M., Maes G.E., Castonguay M., Riemann L., Aarestrup K., Munk P., Sparholt H., Hanel R. & Bernatchez L. 2011. All roads lead to home: panmixia of European eel in the Sargasso Sea. *Mol. Ecol.*, 20, 1333–1346.
- Aprahamian, M.W. 1988. Age structure of eel (*Anguilla anguilla* (L.)) populations in the rivers Severn (England) and Dee (Wales). *Aquacult. Fish. Manage.* 19, 365-376.
- Baisez A. & Laffaille P. 2005. Un outil d'aide à la gestion de l'anguille : le tableau de bord anguille du bassin Loire. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 378-379, 115-130.
- Baran P., Basilio L., Larinier M., Rigaud C. & Travade F. 2011. Plan de sauvegarde de l'anguille, quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages. Rencontres de l'ONEMA, Séminaire du programme R&D Anguilles Ouvrage, les 28 et 29 novembre 2011, Paris 156pp.
- Bardonnat A., Rigaud C. & Labonne J. 2005. Etude expérimentale des comportements de civelles d'*Anguilla anguilla* L. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 378-379, 47-65.
- Baras E., Jeandrain D., Serouge B. & Philippart J.C. 1998. Seasonal variations in time and space utilization by radio-tagged yellow eels *Anguilla anguilla* (L.) in a small stream. *Hydrobiologia* 371/372, 187–198.
- Baras E., Philippart J.C. & Salmon B., 1996. Estimation of migrant yellow eels stock in large rivers through the survey of fish passes: a preliminary in the River Meuse (Belgium). In Cowx I. G. (ed.): *Stock assessment in inland fisheries*. Oxford Fishing news books (Blackwell), London, U. K., pp 314–325.
- Baudoin J.M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Ovidio M., Sremski W., Steinbach P. & Voegtle B. 2014. Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. Onema. 200 pp.
- Belpaire C., Buysse D., Breine J., Verreycken H., Ovidio M., Nzau Matondo B., Meyer J.D., Adrianes D., Roland Kathleen, Kestemont P., Rollin X. & Vlietinck K. 2013. Report on the eel stock and fishery in Belgium, 50pp.
- Bisgaard J. & Pedersen M. I. 1991. Mortality and growth of wild and introduced cultured eels *Anguilla anguilla* (L.) in a Danish stream, with special reference to a new tagging technique. *Dana* 9, 57–69.
- Bonhommeau S., Chassot E. & Rivot E. 2008. Fluctuations in European eel (*Anguilla anguilla*) recruitment resulting from environmental changes in the Sargasso Sea. *Fish. Oceanogr.* 17, 32–44.
- Bureau du Colombier S., Jacobs L., Gesset C., Elie P. & Lambert P. 2015. Ultrasonography as a non-invasive tool for sex determination and maturation monitoring in silver eels. *Fish. Res.* 164, 50-58.
- Carss D.N., Elston D.A., Nelson K.C. & Kruuk H. 1999. Spatial and temporal trends in unexploited yellow eel stocks in two shallow lakes and associated streams. *J. Fish Biol.* 55, 636–654.
- Castonguay M., Dutil J.D., Audet C. & Miller R. 1990. Locomotor activity and concentration of thyroid hormones in migratory and sedentary juvenile American eels. *T. Am. Fish. Soc.* 119, 946-956.
- Chadwick S., Knights B., Thorley J.L. & Bark A. 2007. A long-term study of population characteristics and downstream migrations of the European eel *Anguilla anguilla* (L.) and the effects of a migration barrier in the Girnock Burn, north-east Scotland. *J. Fish Biol.* 70, 1535–1553.
- Clough S.C., Lee-Elliott I.E., Turnpenny A.W.H., Holden S.D.J. & Hinks C. 2004. Swimming speeds in fish: phase 2. R&D Technical Report W2-049/TR1 pp 93 www.environment-agency.gov.uk
- 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. *Mar. Freshw. Res.* 56, 619–627.
- Dekker W. 1998. Long-term trend in the glass eels immigrating at Den Oever, The Netherland. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 349, 199-214.

- Dekker W. 2003. Did lack of spawners cause the collapse of the European eel, *Anguilla anguilla*? *Fisheries Manag. Ecol.* 10, 365–376.
- Delcourt J., Ylieff M., Bolliet V., Poncin P. & Bardonnnet A. 2011. Video tracking in the extreme: A new possibility for tracking nocturnal underwater transparent animals with fluorescent elastomer tags. *Behav. Res.* 43, 590–600.
- Désaunay Y. & Guérault D. 1997. Seasonal and long-term changes in biometrics of eel larvae: a possible relationship between recruitment variation and North Atlantic ecosystem productivity. *J. Fish Biol.* 51, 317–339.
- De Leo G. A. & Gatto M. 1995. A size and age-structured model of the European eel (*Anguilla anguilla* L.). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52, 1351–1367.
- Durif C, Dufour S. & Elie P. 2005. The silvering process of *Anguilla Anguilla*: a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. *J. Fish Biol.* 66, 1025–1043.
- Edeline E., Dufour S. & Elie P. 2009. Proximate and ultimate control of eel continental dispersal, chapter published in "Spawning Migration of the European Eel Reproduction Index, a Useful Tool for Conservation Management 433-461" DOI : 10.1007/978-1-4020-9095-0\_18
- Feunteun E., Laffaille P., Robinet T., Briand C., Baisez A., Olivier J.M. & Acou A. 2003. A review of upstream migration and movements in inland waters by Anguillid eels: Toward a general Theory. *Eel Biology*, p 191-213.
- Feunteun E, Acou A, Laffaille P, Legault A 2000. European eel (*Anguilla anguilla*) : prediction of spawner escapement from continental population parameters. *Can J Fish Aquat Sci* 57:1627-1635.
- Gascuel D. 1986. Flow carried and swimming migration of the glass eel (*Anguilla anguilla*) in the tidal area of a small estuary on the French Atlantic coast. *Helgoländer Meeresun.* 40, 321-326.
- Hanski I. 1998. Metapopulation dynamics. *Nature* 396, 41–49. ICES. 2010. ICES Advice 2010, Book 9.
- Henderson P.A., Plenty S.J., Newton L.C. & Bird D.J. 2012. Evidence for a population collapse of European eel (*Anguilla anguilla*) in the Bristol Channel. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 92, 843–851.
- Ibbotson A., Smith J., Scarlett P. & Aprahamian M.W. 2002. Colonisation of freshwater habitats by the European eel *Anguilla anguilla*. *Freshwater Biol.* 47, 1696–1706.
- ICES 2013. Report of the Joint EIFAAC/ICES Working Group on Eels (WGEEL), 18-22 March 2013 in Sukarietta, Spain, and 4–10 September 2013 in Copenhagen, Denmark. ICES CM 2013/ACOM:18. 851 pp.
- ICES 2014. Report of the Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eels, 4–10 November 2014, Tunis, Tunisia. ICES CM 2014/ACOM:18.
- Jellyman D.J., Bonnet M.L., Sykes J.R. & Johnstone P. 2003. Contrasting use of daytime habitat by two species of freshwater eel *Anguilla spp.* in New Zealand rivers. *Am. Fish. Soc. Symp.* 33:63–78.
- Jessop B.M. 2000. Estimates of population size and instream mortality rate of American eel elvers in a Nova Scotia River. *T. Am. Fish. Soc.* 129, 514 – 526.
- Jessop B.M., Shiao J.C., Iizuka Y. & Tzeng W.N. 2004. Variation in the annual growth, by sex and migration history, of silver American eels *Anguilla rostrata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 272, 231–244
- Kennedy M. & Fitzmaurice P. 1971. Growth and Food of Brown Trout *Salmo trutta* (L.) in Irish Waters. *P. Roy. Irish Acad. B.* 71, 269-352.
- Kvidsten N. A. 1983. Ascent of elvers (*Anguilla anguilla*) in the stream Imsa Norway. *Rep. Inst. Freshw. Res.* 62, 71-74.
- Legault A. 1988. Le franchissement des barrages par l'escalade de l'anguille. Etude de la Sèvre Niortaise. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 308, 1-10.
- Linton E. D., Jonsson B. & Noakes D. 2007. Effect of water temperature on the swimming and climbing behaviour of glass eels, *Anguilla spp.* *Environ. Biol. Fish.* 78, 189-192.
- Lobón-Cerviá J., Utrilla C.G. & Rincón P.A., 1995. Variations in the population dynamics of the European eel *Anguilla anguilla* (L.) along the course of a Cantabrian river. *Ecol. Freshw. Fish* 4, 17–27.
- Lucas M.C. & Baras E. 2001. Migration of Freshwater Fishes. Blackwell Science: Oxford.
- MacNamara R. & McCarthy T.K. 2014. Silver eel (*Anguilla anguilla*) population dynamics and

- production in the River Shannon, Ireland. *Ecol. Freshw. Fish* 23, 181–192.
- Malavoi J. R. & Souchon Y. 2002. Description Standardisée Des Principaux Faciès D'Écoulement Observables En Rivière : Clé De Détermination Qualitative Et Mesures Physiques. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 365-366, 357–372. doi:10.1051/kmae:2002040
- Mann R.H.K. 1982. The annual food consumption and prey preferences of pike (*Esox lucius*) in the River Frome, Dorset. *J. Anim. Ecol.* 51, 81–95.
- Mann R.H.K. & Blackburn J.H. 1991. The biology of the eel (*Anguilla anguilla* L.) in an English chalk stream and interactions with juvenile trout *Salmo trutta* L. and salmon *Salmo salar* L. *Hydrobiologia* 218, 65–76.
- McGovern P. & McCarthy T. K. 1992. Elver migration in the river Corrib system, western Ireland. *Ir. Fish. Investig.* 36, 25-32.
- Moriarty, C. 1986. Riverine migration of young eels *Anguilla anguilla* (L.). *Fish. Res.* 4, 43–58.
- Moriarty C. 1990. European catches of elver of 1928-1988. *Intern. Revue Hydrobiol. Hydrogr.* 75, 701–706.
- Moriarty C. & Dekker W. (Eds) (1997) Management of the European eel. Fisheries Bulletin, Vol. 15, The Marine Institute, Dublin, Ireland pp 110.
- Naismith I.A. & Knights B. 1988. Migrations of elvers and juvenile European eels, *Anguilla anguilla* L., in the River Thames. *J. Fish Biol.* 33,161–175.
- Nzau Matondo B., Philippart J.C., Dierckx A., Benitez J.P. & Ovidio M. 2014. Arrival of European eel in Belgian part of the Meuse: who and how are they? *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Ecohydraulics, Trondheim, Norway.* <http://hdl.handle.net/2268/170392>
- Ordeix M., Pou-Rovira Q., Sellarès N., Bardina M. Casamitjana A., Salà C. & Munné A. 2011. Fish pass assessment in the rivers of Catalonia (NE Iberian Peninsula). A case study of weirs associated with hydropower plants and gauging stations. *Limnetica* 30, 405 – 426.
- Ovidio M., Seredynski 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 Ecol.* 47, 291–301.
- Owen S.F. 2001. Meeting energy budgets by modulation of behaviour and physiology in the eel (*Anguilla anguilla* L.). *Comp. Biochem. Physiol.* Part A 128, 631-6.44
- Pedersen M.I. 2000. Long-term survival and growth of stocked eel, *Anguilla anguilla* (L.), in a small eutrophic lake. *Dana* 12, 71–76.
- Pedersen M.I. 2009. Does Stocking of Danish Lowland Streams with Elvers Increase European Eel Populations? *Am. Fish. Soc. Symp.* 58, 149–156.
- Philippart J.C. 1989. Ecologie des populations de poissons et caractéristiques physiques et chimiques des rivières sans le bassin de la Meuse belge. *Bull. Soc. Géogr. Liège* 25, 175-198.
- Philippart J.C. & Rimbaud G. 2005. L'efficacité de la nouvelle grande échelle à poissons du barrage de Visé-Lixhe sur la Meuse. Eléments du suivi scientifique 1999-2004. Extrait d'un rapport de synthèse, Université de Liège. 23pp.
- 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. Rapport pour l'année 2009 à la Commission provinciale de Liège du Fonds piscicole du Service Public de Wallonie, 161 pages (mars 2010).
- Philippart J.C. & Vranken M. 1983. Atlas des poissons de Wallonie. Distribution, écologie, éthologie, pêche, conservation. *Cah. Ethol. Appl.* 3 (suppl.1-2), 395 p.
- Quintella B.R., Mateus C.S., Costa J.L., Domingos I. & Almeida P.R. 2010. Critical swimming speed of yellow- and silver-phase European eel (*Anguilla anguilla*,L.). *J. Appl. Ichthyol.* 26, 432–435.
- Robinet T., Acou A., Boury P. & Feunteun E. 2007. Concepts for characterizing spawning biomass of the European eel (*Anguilla anguilla*) in catchments. *Vie et Milieu* 57: 201–211.
- Simon J. & Dörner H. 2014. Survival and growth of European eels stocked as glass- and farm-sourced eels in five lakes in the first years after stocking. *Ecol. Freshw. Fish* 23, 40-48.

Simon J., Dörner H., Scott R.D., Schreckenbach K. & Knösche R. 2013. Comparison of growth and condition of European eels stocked as glass and farm sourced eels in lakes in the first four years after stocking. *J. Applied Ichthyol.* 29, 323–330.

Sheer MB & Steel EA. 2006. Lost watersheds: barriers, aquatic habitat connectivity, and salmon persistence in the Willamette and lower Columbia River basins. *T. Am. Fish. Soc.* 135, 1654–1669.

Svärdson G. 1976. The decline of the Baltic eel population. *Rep. Inst. Freshw. Res. Drottningholm* 55, 136–143.

Tesch F.W. 2003. The Eel. J.E. Thorpe (ed.), 3<sup>rd</sup> edn. London: Blackwell Publishing, pp 408.

UE - Union européenne, 2007. Règlement (CE) N° 1100/2007 du Conseil du 18 septembre 2007 instituant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes. *Journal officiel de l'Union européenne du 22 septembre 2007*, L 248, 17-23.

van Ginneken V.J.T. & Maes G.E. 2005. The European eel (*Anguilla anguilla*, Linnaeus), its

lifecycle, evolution and reproduction: a literature review. *Rev. Fish Biol. Fisher.* 15, 367–398.

Vlieting, K. (coordinateur), Philippart J.C., Gomez da Silva S. & Thirion A. 2008. Council REGULATION (EC) N° 1100/2007 establishing measures for the recovery of the stock of European eel. Eel management plan for Belgium, 198 pages.

White E.M. & Knights B. 1997. Environmental factors affecting migration of the European eel in the Rivers Severn and Avon, England. *J. Fish Biol.* 50, 1104–1116.

Wickström H. 1986. Studies on the European eel by the Institute of Freshwater Research 1977–85. *Information från Sötvattenslaboratoriet Drottningholm* 13, 43 p. (In Swedish with English summary.)

Žydelis R. & Kontautas A. 2008. Piscivorous birds as top predators and fishery competitors in the lagoon ecosystem. *Hydrobiologia* 611, 45–54.