



*Cette action est cofinancée par l'Union Européenne. L'Europe s'engage dans le bassin de la Loire avec le Fond européen de développement régional.*

## Rapport d'activité

Du 01/01/13 au 31/12/13

Fonds Européen de Développement Régional



## FRONT DE COLONISATION DE L'ANGUILLE EUROPEENNE EN LOIRE, ANNEE 2013

Julie CANAL<sup>1</sup>, Pascal LAFFAILLE<sup>1</sup>, Jean Michel BACH<sup>2</sup>, Timothé PAROUTY<sup>2</sup>, Cédric LEON<sup>2</sup>, Angéline SENECAL<sup>2</sup>, Pierre PORTAFAIX<sup>2</sup>, Quentin RIVARD<sup>2</sup>, Adrien BARAULT<sup>2</sup> & Aurore BAISEZ<sup>2</sup>

1. Laboratoire Ecolab (Ecologie Fonctionnelle et Environnement), UMR 5245 CNRS - UPS - INPT, Avenue de l'Agrobiopole – BP 32 607, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France.

2. Association Logrami

Et la participation de :

**Association LOGRAMI**

**Cellule Allier**

8 rue de la ronde

03500 St Pourçain sur Sioule

**Adrien BONNIN,**

**Loris BERNAGAUD,**

**Mélanie HILAIRE,**

**Félix POINTEAU**

**Décembre 2013**

**Association LOGRAMI**

**Cellule Vienne**

112 Faubourg de la Cueilie

**Remerciements pour leur contribution :**

**Timothée BESSE**

**Fédérations pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (FDPPMA) de Loire-Atlantique, Maine-et-Loire, Indre-et-Loire, Mayenne, Sarthe, Vendée, Cher, Loir-et-Cher, Loiret, Saône-et-Loire, Loire, Haute-Loire, Lozère, Allier et Puy de Dôme.**



---

# FRONT DE COLONISATION DE L'ANGUILLE EUROPEENNE EN LOIRE, ANNEE 2013

---



*Rapport Final*

*Décembre 2013*

Dessin Jacques Cartier - Archives  
Larousse

Julie CANAL<sup>1</sup>, Timothée BESSE<sup>2</sup>, Aurore BAISEZ<sup>2</sup>, Pascal LAFFAILLE<sup>1</sup>

1. Laboratoire Ecolab (Ecologie Fonctionnelle et Environnement), UMR 5245 CNRS - UPS - INPT, Avenue de l'Agrobiopole  
– BP 32 607, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France.

2. Association Logrami, 8 rue de la ronde 03500 Saint Pourçain sur Sioule, France

---

## AVANT-PROPOS

---

Ce rapport présente les résultats de l'étude de la sous-population d'anguilles dans le bassin versant de la Loire par la méthode des échantillonnages ponctuels d'abondance, réalisée en 2013.

La maîtrise d'ouvrage de ces actions a été assurée par le laboratoire Ecolab (UMR 5245), l'association Logrami ainsi que les Fédérations pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (FDPPMAs) de Loire-Atlantique, Maine-et-Loire, Indre-et-Loire, Mayenne, Sarthe, Vendée, Cher, Loir-et-Cher, Loiret, Saône-et-Loire, Loire, Haute-Loire, Lozère, Allier et Puy de Dôme.

Le projet a été financé par l'Union Européenne, l'agence de l'eau Loire-Bretagne, l'Etablissement public Loire, les régions Centre et Pays de la Loire, la Fédération Nationale pour la Pêche en France et Logrami.



Conformément au contrat de collaboration de recherche établi avec le CNRS, les résultats de l'étude font l'objet d'un rapport transmis par le Responsable Scientifique. Ce dernier a été validé par LOGRAMI.



---

## REMERCIEMENTS

Ces remerciements s'adressent aux Fédérations de Pêche et à leur personnel, ainsi qu'aux équipes de LOGRAMI sans qui ces données ne pourraient avoir été obtenues à l'échelle du bassin versant.

Ils s'adressent également à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide durant la phase d'échantillonnage : Axel, Maxime, Marine, Christine, Rémy, Laurent, et Jean-Claude.

Nous remercions également Cédric Briand et Pierre Steinbach, qui nous ont fourni respectivement les données du modèle EDA 2.X et la base de données « ouvrages » disponible à l'échelle de la Loire.

Ces remerciements s'adressent enfin aux partenaires financiers pour leur contribution à la réalisation de cette étude.

## Table des matières

---

Rapport Final .....	1
Décembre 2013 .....	1
AVANT-PROPOS.....	2
REMERCIEMENTS .....	2
Table des matières .....	3
1 - L'anguille européenne, une espèce en danger critique d'extinction.....	1
2 – Front de colonisation des jeunes anguilles et stock en place en Loire aval.....	4
2.1 – Contexte et objectifs .....	4
2.2 – Méthodologie .....	4
2.2.1 - Protocole de pêche .....	4
2.2.2 – Choix et localisation des stations .....	5
2.2.3 – Hydrologie et connectivité des annexes hydrauliques de la Loire aval.....	6
2.2.4 – Analyse des résultats.....	8
2.2.4.1 – Indices d'abondance.....	8
2.2.4.2 – Probabilités de présence .....	9
2.3 – Résultats .....	10
2.3.1 - Caractéristiques des stations échantillonnées et population en place dans les annexes hydrauliques en 2013 .....	10
2.3.2 – Probabilité de présence en anguilles dans les annexes hydrauliques.....	14
2.3.2.1 – Le front de colonisation.....	14
2.3.2.2 – Le recrutement fluvial .....	15
2.4 – Discussion .....	16
2.4.1 – La population en place dans les annexes hydrauliques en 2013 .....	16
2.4.1.1 – La distance à la limite tidale .....	16
2.4.1.2 – L'année .....	17
2.4.1.3 – Le degré de connectivité .....	17
2.4.2 – Comparaison des effectifs d'anguilles dans les annexes en 2005, 2010 et 2013 au moyen d'indices d'abondance.....	18
2.5 – Conclusion .....	19

3 – Cartographie de la population d’anguille européenne dans le bassin versant de la Loire .....	20
3.1 – Méthodologie et protocole de pêche.....	20
3.1.1 – Choix et localisation des stations .....	20
3.1.2 – Protocole de pêche.....	22
3.2 – Analyse des données .....	23
3.2.1 – Etat des lieux .....	23
3.2.2 – Modélisation des probabilités de présence de l’anguille dans le bassin versant .....	23
3.2.3 – Comparaison du modèle « Réseau Anguille » et du modèle EDA 2.X.....	24
3.3 – Résultats .....	25
3.3.1 – La population en place en 2013.....	25
3.3.2 – Modélisation des probabilités de présence de l’anguille dans le bassin versant .....	28
3.3.3 – Comparaison du modèle Réseau Anguille et du modèle EDA 2.X.....	31
3.4 - Discussion.....	32
4 – Bilan Général .....	34
5 – Bibliographie.....	35

## TABLE DES FIGURES

---

Figure 1 : Cycle biologique de l'anguille européenne .....	1
Figure 2 : Aire de répartition continentale et océanique de l'anguille européenne.....	1
Figure 3 : Indice de recrutement estimé des civelles pour la mer du Nord et ailleurs en Europe, mis à jour avec les données 2012, par rapport à la moyenne 1960-1970. ....	2
Figure 4 : Répartition systématique des points d'échantillonnage dans une station. ....	5
Figure 5 : Localisation des stations échantillonnées le long de la Loire aval .....	5
Figure 6 : Exemple de station d'échantillonnage : la boire de Savennières, échantillonnée en 2005, 2010 et 2013.....	6
Figure 7 : Typologie de la connectivité latérale de la plaine d'inondation .....	7
Figure 8 : Débits journaliers moyens de la Loire mesurés à Montjean-sur-Loire en 2005, 2010 et 2013. ....	7
Figure 9 : Abondance moyenne des anguilles en fonction de la distance des stations à la limite tidale. ....	11
Figure 10 : Abondance moyenne pour chaque groupe de classe de taille en fonction du compartiment .....	12
Figure 11 : Abondance moyenne des anguilles selon le degré de connectivité des annexes.....	13
Figure 12 : Abondance moyenne pour chaque groupe de classe de taille selon le degré de connectivité .....	14
Figure 13 : Présences d'anguilles, par classes de tailles, dans les annexes hydrauliques de la Loire échantillonnées en 2013. ....	14
Figure 14 : Evolution des fronts de colonisation dans les annexes hydrauliques de la Loire en 2005, 2010 et 2013.....	15
Figure 15 : Localisation des stations du réseau anguille .....	21
Figure 16 : Répartition des stations échantillonnées par organisme de pêche .....	21
Figure 17 : Exemples de stations d'échantillonnage : bras secondaire du Thouet, à Gourgé (Deux-Sèvres) ; annexe hydraulique de la Loire, à Chambilly (Saône-et-Loire).....	22
Figure 18 : Prédications du modèle de présence-absence sur le réseau RHT pour le mois de septembre 2009.....	24
Figure 19 : Répartition des densités d'anguilles, toutes classes de tailles confondues, en fonction des sous-bassins versants .....	26
Figure 20 : Répartition des densités d'anguilles, par classes de tailles, au sein des sous-bassins versants. ....	27
Figure 21 : Nombre moyen de barrage à l'aval des stations dans les différents sous bassin versant ..	28
Figure 22 : Probabilités de présence de l'anguille selon le modèle Réseau Anguille. ....	29
Figure 23 : Répartition des probabilités de présence des anguilles selon le modèle de distribution issu du Réseau Anguille, par classe de taille .....	30
Figure 24 : Comparaison des probabilités de présence des anguilles, toutes classes de tailles confondues, du modèle Réseau Anguille et du modèle EDA 2.X. ....	31

## TABLE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Nombre de stations par compartiment en 2013 .....	6
Tableau 2 : Connectivité des stations de lors de l'échantillon de 2013. ....	6
Tableau 3 : Caractéristiques des 37 stations échantillonnées en 2013 dans les annexes hydrauliques de la Loire. ....	10
Tableau 4 : Tableau des abondances moyennes d'anguilles dans les annexes de la Loire aval en 2005, 2010, et 2013.....	13
Tableau 5 : Composition des 9 sous-bassins échantillonnés en 2013.....	23
Tableau 6 : Effectifs d'anguille capturés dans les différents cours d'eau en 2013 par classes de taille. ....	25

# 1 - L'anguille européenne, une espèce en danger critique d'extinction

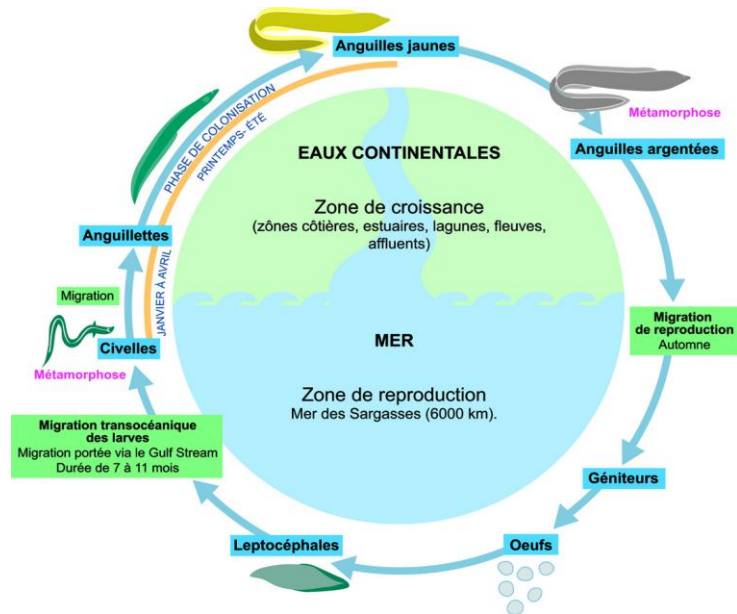


Figure 1 : Cycle biologique de l'anguille européenne (source: <http://www.planrhone.fr>)

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*, Linnaeus, 1758) est une espèce migratrice amphihaline thalassotoque semelpare, qui colonise une large gamme de milieux aquatiques continentaux, dans lesquels elle effectue une phase de croissance, qui dure majoritairement de 3 à 9 ans pour les mâles et de 5 à 18 ans pour les femelles (Adam *et al.*, 2008). A l'issue de cette phase, débute la maturation sexuelle qui s'achève par une migration vers la mer des Sargasses, où aurait lieu la reproduction (Figure 1).

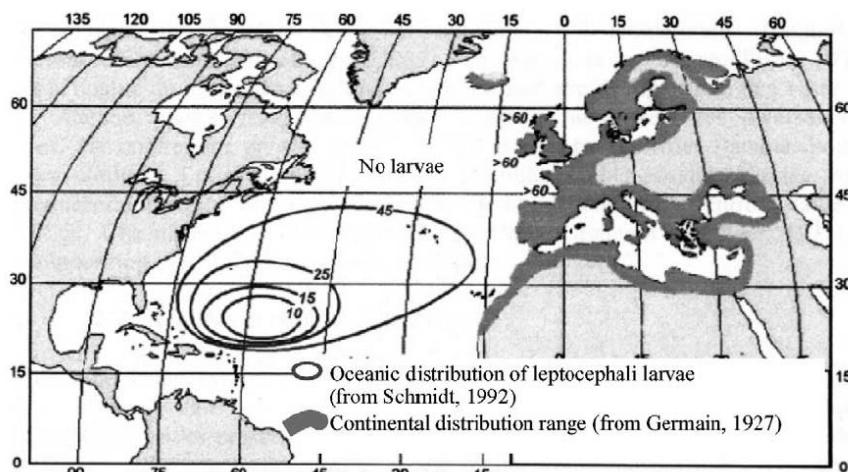


Figure 2 : Aire de répartition continentale et océanique (par classes de longueur des larves en millimètres) de l'anguille européenne (Feunteun, 2002)

L'anguille européenne est présente dans les hydrosystèmes en connexion avec l'océan Atlantique ou la mer Méditerranée, du cercle polaire arctique au Tropique du Cancer, et de l'Islande à la mer Noire (Figure 2). Présente dans de nombreux cours d'eau européens, elle peut dominer les parties aval des bassins versants (données Onema à l'échelle française). L'anguille, en tant que prédateur supérieur



et grand migrateur, joue un rôle majeur dans le fonctionnement des écosystèmes. Selleslagh et al. (2011) l'ont ainsi identifiée comme élément clé des réseaux trophiques côtiers. Buisson et al. (2012) ont également mis en évidence qu'elle possédait une combinaison de caractéristiques biologiques et écologiques originales (et finalement un rôle fonctionnel original) par rapport aux autres espèces de poissons d'eau douce en France. Indépendamment de son rôle écologique important, elle représente également une ressource socio-économique de premier ordre pour les populations riveraines des cours d'eau. En effet, chacun de ces stades de développement (civelle, anguille jaune et anguille argentée) est exploité par des pêcheurs professionnels ou de loisir (Dekker 2000 ; Baisez & Laffaille, 2005).

Toutefois, depuis la fin des années 1970 et le début des années 1980, un important déclin de la population d'anguille a été mis en évidence (Figure 3) par de très nombreuses études (e.g. Bruslé, 1990 ; Chancerel, 1994 ; Moriarty & Dekker, 1997 ; Dekker, 2003a ; Dekker, 2003b ; ICES 2013). Les causes de ce déclin sont multifactorielles et il est actuellement impossible de quantifier la part de chacun (e.g. Moriarty & Dekker, 1997 ; Feunteun, 2002 ; Laffaille *et al.*, 2003 ; Friedland et al., 2007 ; Bonhommeau et al., 2008 ; Charrier *et al.*, 2012) : les changements climatiques (e.g. modification du climat, des débits, des courants marins), diminution de la productivité océanique, dégradation des habitats, dégradation de la qualité de l'eau, les pathologies propres à l'espèce (e.g. le parasite *Anguicolla crassus*, le virus Evex), les invasions de prédateurs aquatiques, la présence d'obstacles à la migration, l'exploitation par la pêche, la mortalité induite par l'hydroélectricité, ...

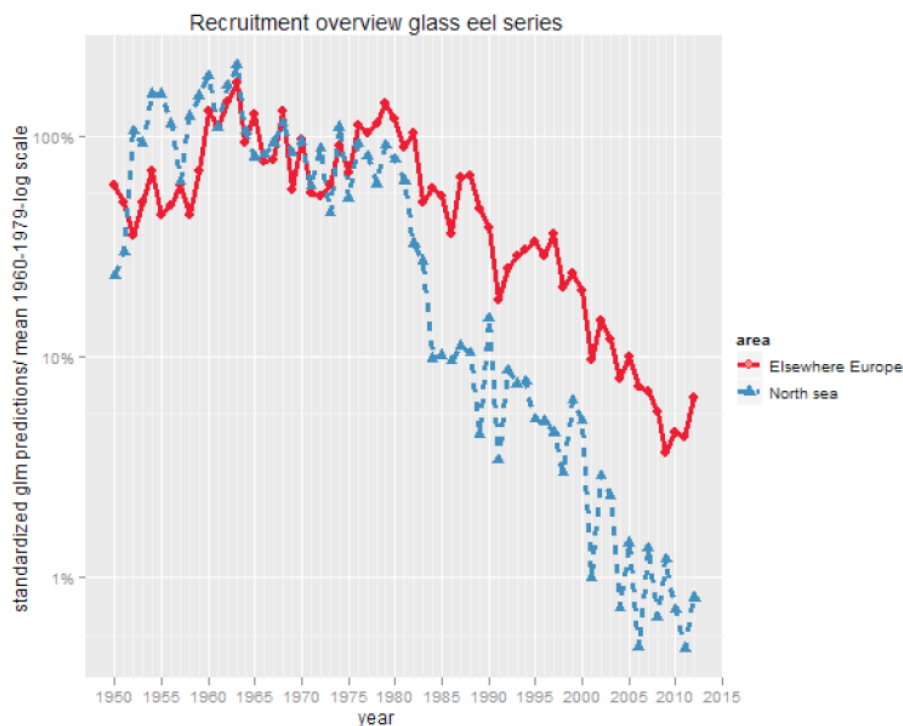


Figure 3 : Indice de recrutement estimé des civelles pour la mer du Nord et ailleurs en Europe, mis à jour avec les données 2012, par rapport à la moyenne 1960-1970 (ICES, 2012).

L'importance socio-économique de l'espèce, et son rôle clé dans le fonctionnement des écosystèmes rendent nécessaire sa préservation au sein des hydrosystèmes. Ainsi, en 1999, l'anguille a été reconnue par le CIEM<sup>1</sup> comme « en dehors de ses limites biologiques de sécurité ». En 2008,

<sup>1</sup> CIEM : Conseil International pour l'Exploration de la Mer

l'anguille européenne a été classée comme « espèce en danger critique d'extinction » dans la liste rouge de l'UICN<sup>2</sup> et en 2009, elle a intégré l'annexe II de la convention de Washington (ou convention CITES), qui stipule que « l'exploitation durable de l'anguille européenne n'est plus garantie ».

Pour limiter, voire endiguer, ce déclin, de nombreux textes ont été adoptés, comme le règlement européen R(CE) n°1100/2007 du 18 septembre 2007, qui met en place des mesures de reconstitution de la population d'anguilles, avec, à long terme, l'atteinte d'une biomasse de géniteurs équivalente à 40% de la population pristine. À l'échelle française, un plan d'action de gestion de l'anguille européenne a été déposé le 31 décembre 2008, agissant sur l'ensemble des causes de mortalité de l'espèce, qui s'articule autour de cinq grands types de mesures que sont les obstacles à la continuité écologique, la pêche légale ou non, les pollutions et les habitats et le repeuplement.

Suite à l'application de ce Plan de Gestion Anguille dans le bassin de la Loire, et à la mise en place de mesures de gestion qui en découlent, l'objectif de notre étude a été (i) d'évaluer l'importance du recrutement des jeunes anguilles sur la Loire depuis la mise en place de ces mesures, par le suivi du front de colonisation des jeunes anguilles dans la partie aval du bassin-versant, et (ii) d'établir une cartographie de l'état actuel de la sous-population d'anguilles dans l'ensemble du bassin versant de la Loire.

---

<sup>2</sup> UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

## 2 – Front de colonisation des jeunes anguilles et stock en place en Loire aval

### 2.1 – Contexte et objectifs

La position géographique de l'estuaire de la Loire (Baisez & Laffaille, 2005) et l'absence d'obstacles sur la plupart de l'axe principal (Laffaille *et al.*, 2009) font de ce fleuve l'un des plus favorables à la colonisation par les anguilles européennes. Deux études antérieures ont estimé, en 2005 et 2010 (Besse & Laffaille, 2005 ; 2010), le recrutement fluvial des jeunes anguilles, ainsi que la population en place dans la partie aval de Loire.

L'objectif de la première partie de notre étude est de réaliser le même protocole d'échantillonnage afin de comparer les résultats actuels, après mise en place des mesures de gestion du plan Loire, à ceux des deux études précédentes, pour évaluer l'impact de ces mesures sur le recrutement fluvial des jeunes anguilles et sur la population en place à l'aval.

### 2.2 – Méthodologie

#### 2.2.1 - Protocole de pêche

Les annexes hydrauliques ont été échantillonnées par pêche électrique, selon la méthode des échantillonnages ponctuels d'abondance (EPA) (Nelva *et al.*, 1979) adaptée pour l'anguille (Laffaille *et al.*, 2005b). Le matériel de pêche utilisé se compose d'un appareil de pêche électrique thermique de type EL64-II (®EFKO) équipé d'une anode de 30 cm à l'extrémité d'un manche d'1,50 m. Deux épuisettes à cadre métallique de bord inférieur droit de 40 et 60 cm, de maille de 2 mm et une petite épuisette carrée de 25 cm avec des mailles de 1,5 mm ont permis de récupérer les anguilles.

Dans chaque station, 30 points d'échantillonnage ont été effectués (avec un minimum de 30 secondes de pêche par point) sur une distance d'au-moins 100 mètres. Les points ont été répartis systématiquement tous les 3 mètres (Figure 4) en tachant de visiter un panel représentatif des habitats disponibles sur la station. La méthode a été, autant que possible, reproduite aux mêmes endroits que lors des campagnes effectuées en juin 2005 et 2010, pour comparer les résultats en limitant les biais et les sources d'incertitude potentielles dues aux relations anguilles-micro-habitats.

Dans chacune des stations, un relevé des caractéristiques de l'habitat a été effectué (types de faciès (%), types de substrat (%), présence d'habitats pour les poissons, type de végétation aquatique (%), ombrage (%), occupation du lit majeur (urbain, agricole, forêt), largeur et profondeur moyenne (en m) (voir Annexe 1 : Fiche Terrain).

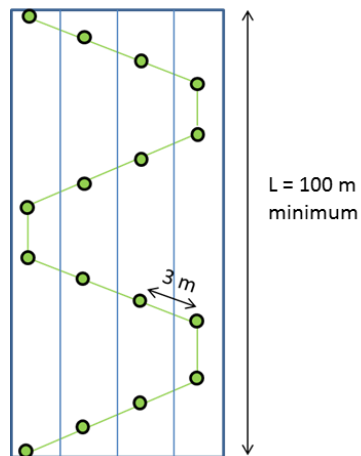


Figure 4 : Répartition systématique des points d'échantillonnage dans une station.

Des informations générales sur la station (coordonnées GPS, commune, etc.), ainsi que les effectifs d'anguilles par EPA et par classes de taille (< 150 mm, 150-300 mm, 301-450 mm et > 450 mm), la taille de chaque anguille, ainsi que les effectifs des autres espèces de poissons échantillonnées ont également été relevés.

### 2.2.2 – Choix et localisation des stations

Afin de comparer au mieux les résultats avec ceux des deux campagnes précédentes, l'ensemble des stations (i.e. les annexes hydrauliques de la Loire aval) précédemment échantillonnées ont été ré-échantillonnées en 2013. Sur la Loire aval, entre Nantes et Saumur, un total de 37 stations (35 stations identiques aux échantillonnages précédents de 2005 et 2010 ainsi que les annexes de la Nigaudière et de Guillemette) a été prospecté entre le 17 et le 27 juin 2013 (Figure 5).

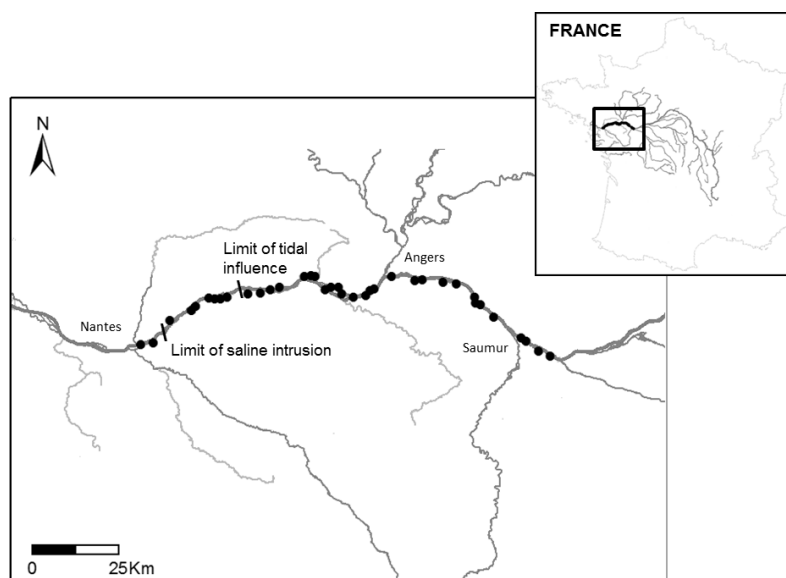


Figure 5 : Localisation des stations échantillonnées le long de la Loire aval (modifié de Lasne *et al.*, 2008)

Ces stations sont représentatives de la diversité des habitats disponibles sur la plaine alluviale, connectées plus ou moins fréquemment avec le chenal principal de la Loire (Lasne *et al.*, 2008 ; Figure 6).

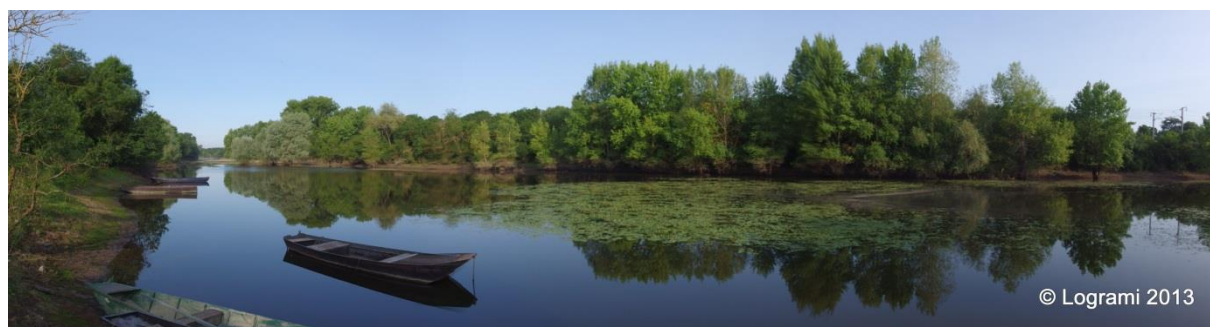


Figure 6 : Exemple de station d'échantillonnage : la boire de Savennières, échantillonnée en 2005, 2010 et 2013.

Elles ont été regroupées en 3 compartiments (Tableau 1). Le premier, le compartiment aval (Compartiment A) est situé entre la confluence de la Loire et de la Sèvre Nantaise, et la limite d'influence tidale. Le compartiment intermédiaire (Compartiment B) a sa limite amont à la confluence entre la Loire et la Maine. Enfin, le compartiment amont (Compartiment C) se situe en amont de cette confluence.

Tableau 1 : Nombre de stations par compartiment en 2013

Compartiment	A Aval	B Intermédiaire	C Amont	Total
Nombre de stations échantillonnées	10	14	13	37

### 2.2.3 – Hydrologie et connectivité des annexes hydrauliques de la Loire aval

L'accessibilité des annexes hydrauliques de la Loire est dépendante de leur connectivité avec l'axe principal et de la situation hydrologique de la Loire. La connectivité des sites échantillonnés a été obtenue en classant les annexes hydrauliques en fonction de leur fréquence de connexion avec le cours principal de la Loire (Lasne *et al.*, 2008). Trois niveaux de connectivité ont été identifiés en se basant sur les modalités de connexion pendant la période d'étude. Les sites de type 0 sont uniquement connectés au chenal principal à des niveaux d'eau élevés ; les sites de type 1 sont connectés à des niveaux d'eau intermédiaires, et les sites de type 2 sont connectés la majeure partie de l'année (Figure 7 et Tableau 2).

Tableau 2 : Connectivité des stations de lors de l'échantillon de 2013.

Indice de connectivité	0 Connexion rare	1 Connexion régulière	2 Connexion fréquente	Total
Nombre de stations échantillonnées	11	17	9	37

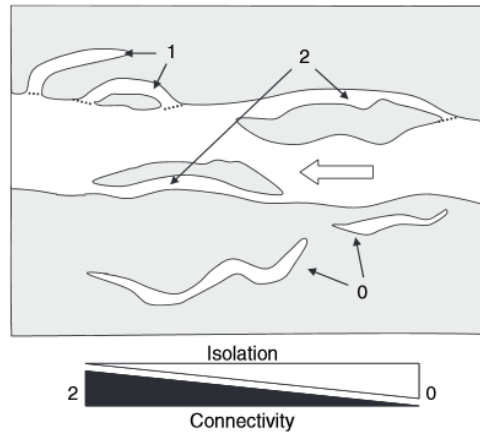


Figure 7 : Typologie de la connectivité latérale de la plaine d'inondation (Lasne *et al.*, 2008).

Le débit influe sur la hauteur d'eau et donc sur la connectivité des annexes et la surface ainsi que la diversité des habitats disponibles (notamment dans les annexes qui sont fortement connectées). La colonisation de l'annexe par l'anguille et les autres espèces de poissons est donc un phénomène intégrateur des périodes d'étiage et de crue passées.

Dans la partie aval de la Loire, les débits maximaux sont observés en hiver (Figure 8) et les régimes d'étiage aux mois d'août et septembre. Durant les épisodes de crue, la plaine alluviale est inondée à l'exception de certains secteurs protégés par des levées, la plupart des annexes sont interconnectées et les poissons sont relativement libres de circuler sur la largeur du lit majeur (Lasne *et al.*, 2007). Les échantillonnages ont été effectués au mois de juin, période où les débits sont suffisamment faibles pour permettre une large hétérogénéité d'habitats dans la plaine inondable et une efficacité de pêche maximale.

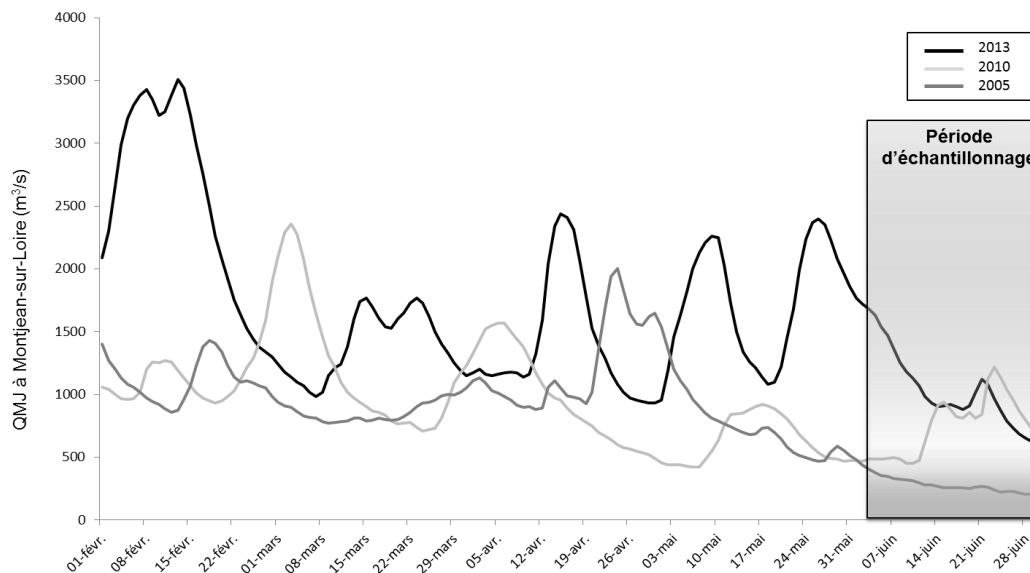


Figure 8 : Débits journaliers moyens (QMJ) de la Loire mesurés à Montjean-sur-Loire en 2005, 2010 et 2013 (données sandre - BD Hydro).

Le débit moyen de la Loire était lors de la période d'échantillonnage de 288 m<sup>3</sup>/s en juin 2005, 735 m<sup>3</sup>/s en 2010 et de 1080 m<sup>3</sup>/s en juin 2013 à Montjean-sur-Loire.

## 2.2.4 – Analyse des résultats

### 2.2.4.1 – Indices d'abondance

Comme en 2005 et 2010, un indice d'abondance (nombre moyen d'anguilles par EPA) a été obtenu pour chaque station et pour différentes classes de tailles : pour toutes les tailles confondues, pour les anguilles de taille inférieure à 150 mm, les anguilles de taille comprise entre 151 et 300 mm, les anguilles de taille comprise entre 301 et 450 mm et enfin, les anguilles de taille supérieure à 450 mm. Ces différentes classes de tailles correspondent aux différentes phases du cycle biologique de l'anguille et sont associées à des comportements et une écologie différents (Laffaille *et al.*, 2003 ; Rigaud *et al.*, 2008). La première classe de taille (< 150 mm) représente les jeunes anguilles récemment recrutées qui commencent la colonisation du bassin versant. La seconde (151 – 300 mm) correspond aux anguilles plus âgées (de 2 à 5 ans) en colonisation active. Les deux classes suivantes représentent les anguilles jaunes sédentaires, respectivement, essentiellement les mâles (301 – 450 mm) et les femelles (> 450 mm).

Pour les comparaisons au sein de l'année 2013, l'ensemble des 37 stations ont été prises en compte, mais pour les comparaisons inter-annuelles, seules les 35 stations communes entre les trois années ont été prises en compte.

Toutes ces classes de taille ont été prises en compte pour l'analyse de la population en place. Nous avons pris en compte les deux classes les plus jeunes (< 150 mm et 151 – 300 mm) dans le compartiment le plus aval afin d'analyser respectivement le recrutement fluvial récent et passé.

Les indices d'abondance ont été analysés en utilisant les tests non paramétriques de Wilcoxon et de Friedman (avec un post-test de Dunn) ou de Mann-Whitney et de Kruskal-Wallis (avec un post test de Dunn).

Les abondances des anguilles ont ensuite été estimées pour chaque station en ajustant un modèle de régression linéaire généralisé (GLM). Les facteurs explicatifs des abondances observées ont été retenus en sélectionnant le modèle le plus parcimonieux, à partir d'un modèle complet comprenant les facteurs suivants :

- Distance à la limite tidale (km)
- Connectivité de l'annexe (0 ; 1 ; 2)
- Année d'échantillonnage (2005 ; 2010 ; 2013)

et les effets combinés de ces facteurs :

- Evolution du front de colonisation (Distance x Année)
- Evolution de la connectivité des annexes (Connectivité x Année)
- Accessibilité des annexes à l'échelle longitudinale (Connectivité x Distance)
- Année x Distance tidale x Connectivité

Les modèles retenus ont été ceux dont les probabilités estimées sont les plus proches des occurrences observées par station, selon le critère d'Akaike (AIC) le plus faible :

$$AIC = -2\log(L) + 2k$$

où  $L$  est le maximum de vraisemblance et  $k$  le nombre de paramètres dans le modèle.

#### *2.2.4.2 – Probabilités de présence*

Nous avons aussi examiné les patrons de distribution des petites anguilles (< 300 mm) le long de l'axe Loire. Nous avons alors utilisé un indice standardisé de recrutement fluvial et de colonisation des bassins versants sur la base de l'analyse des probabilités de présence à l'aide de régressions logistiques (voir Laffaille & Rigaud, 2008 ; Lasne & Laffaille, 2008 ; Lasne & Laffaille, 2009 pour plus de détails). Dans ces analyses, deux paramètres, représentant le front de colonisation et le recrutement fluvial, sont essentiels :

- **La  $D_{0,5}$**  qui correspond à la distance à la limite tidale pour laquelle il existe une probabilité de 0,5 d'observer des anguilles de moins de 30 cm (i.e. une chance sur deux). C'est un indice de colonisation et d'accessibilité. C'est le front de colonisation.
- **La probabilité d'occurrence en aval** (la valeur de l'ordonnée à l'origine de l'abscisse), qui est une mesure de la « saturation » des zones aval. C'est l'indice du recrutement fluvial et de la population en place à l'aval.

L'étude de ces deux paramètres associés permet de visualiser les retombées de mesures de gestion en termes d'intensité du recrutement fluvial sur le bassin versant, de population en place en aval et d'accessibilité du milieu (Laffaille & Rigaud, 2008 ; Lasne & Laffaille, 2009).



## 2.3 – Résultats

### 2.3.1 - Caractéristiques des stations échantillonnées et population en place dans les annexes hydrauliques en 2013

Sur les 37 stations échantillonnées en 2013, 2130 anguilles ont été dénombrées, soit en moyenne 58 ( $\pm 144$ ) anguilles par station (Tableau 3).

**Tableau 3 : Caractéristiques des 37 stations échantillonnées en 2013 dans les annexes hydrauliques de la Loire. <150 : nombre d'anguilles de taille inférieure à 150 mm ; 151-300 : nombre d'anguilles de taille comprise entre 151 et 300 mm ; 301-450 : nombre d'anguilles de taille comprise entre 301 et 450 mm et > 450 : nombre d'anguilles de taille supérieure à 450 mm. Les stations sont classées de l'aval vers l'amont.**

Nom de la station	< 150	151-300	301-450	> 450	Total
Boire Beaulieu	53	9	0	0	62
Boire de Longue Mine	843	4	3	0	850
Boire de Mauves	131	7	8	3	149
Boire d'Anjou	118	23	9	0	150
Boire Chapoin	206	2	0	0	208
Île de la Macrière	5	5	0	0	10
Boire de la Patache	84	8	5	4	101
Boire des Greliers	43	11	2	0	56
Boire de la Nigaudière	128	17	1	3	149
Boire Ste Catherine	24	20	5	2	51
Boire du Seil	1	2	0	0	3
Bras de l'île Moquart	64	44	16	0	124
Boire torse de la Petite Vallée	14	0	6	4	24
Boire de Champtocé Aval	3	1	0	0	4
Boire de Champtocé Medium	5	2	5	8	20
Boire de Champtocé Amont	2	2	12	9	25
Bras du Fourneau du Lion	1	0	0	0	1
Bras des Doneaux	0	1	4	5	10
Boire Girouard	3	1	2	7	13
Bras de Cordez	8	4	1	0	13
La Cretterrie 3	1	1	0	0	2
La Cretterrie 2	4	3	0	1	8
Boire de Guillemette	4	5	0	3	12
Boire de Savennières	14	5	4	0	23
Bras de l'île aux Chevaux	0	1	7	1	9
Boire de Juigné	0	0	1	0	1
Bras de Belle-île	0	0	2	1	3
Boire de Gohier	0	3	3	4	10
Boire des Groseilliers	0	1	1	1	3
Boire de Bessé	0	1	1	1	3
Boire du Cadran	0	1	0	0	1
Bras des Rosiers	1	4	0	0	5
Bras de l'île de Trèves	0	4	2	2	8
Bras de l'île Offard	0	4	3	5	12
Boire du Bénacle	0	0	0	2	2
Boire du Chapeau	0	0	0	0	0
Sablières de Turquant	0	0	4	1	5

Les facteurs explicatifs de la variation d'abondance ont été retenus par la sélection du modèle linéaire généralisé (GLM) le plus parcimonieux, construit à partir du modèle complet :

**Modèle complet :** Abondance (toutes les classes de tailles)  $\sim$  [Année] + [Distance tidale] + [Connectivité] + (Année x Distance tidale x Connectivité)  
AIC = 407,04

Pour les différentes classes de tailles, les modèles retenus sont les suivants :

- **Abondance (< 150 mm)**  $\sim$  [Distance tidale] + [Année] + [Distance tidale x Année]  
AIC = 396,14
- **Abondance (151 - 300 mm)**  $\sim$  [Distance tidale] + [Année] + [Distance tidale x Année]  
AIC = 63,62
- **Abondance (301 - 450 mm)**  $\sim$  [Distance tidale] + [Connectivité] + [Année] + [Distance tidale x Connectivité]  
AIC = 81,71
- **Abondance (> 450 mm)**  $\sim$  [Distance tidale] + [Connectivité] + [Année] + [Distance tidale x Connectivité]  
AIC = -170,41

Les abondances observées sont donc expliquées par :

a. La distance à la limite tidale

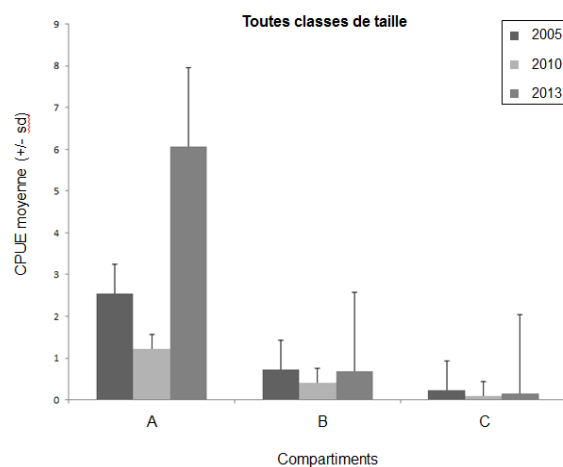


Figure 9 : Abondance moyenne (nombre d'individu moyen par EPA  $\pm$  sd) des anguilles en fonction de la distance des stations à la limite tidale (A : compartiment aval, B : compartiment intermédiaire, C : compartiment amont).

L'abondance totale des anguilles diminue significativement selon un gradient amont-aval (test de Kruskal-Wallis, KW = 21,6,  $p < 0,001$  en 2013) (Figure 9).

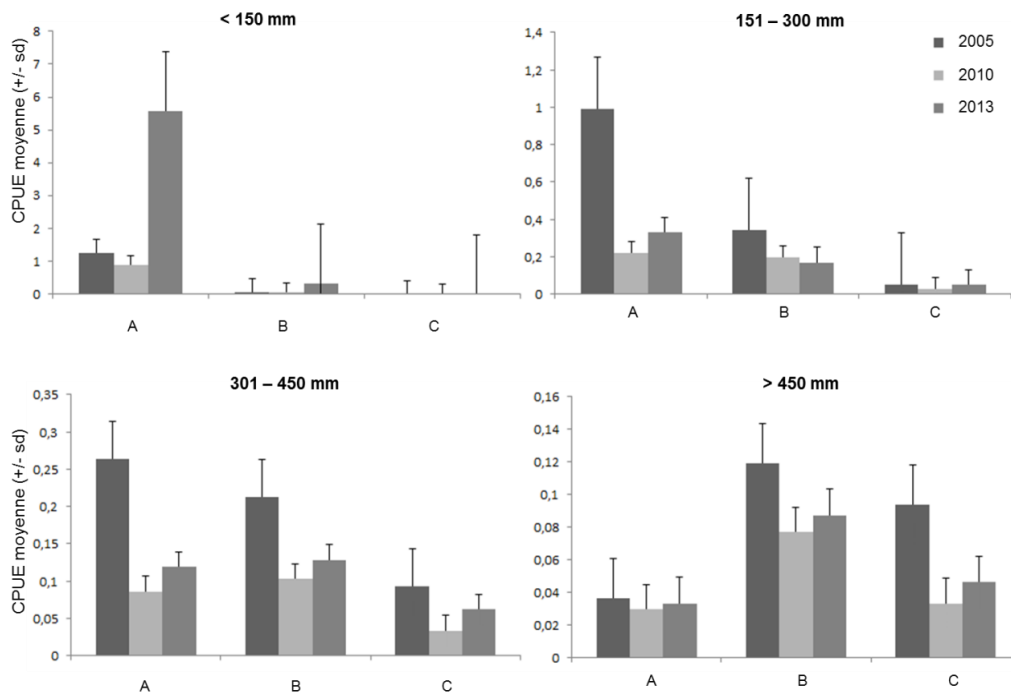


Figure 10 : Abondance moyenne (nombre d'individu moyen par EPA  $\pm$  sd) pour chaque groupe de classe de taille en fonction du compartiment (A : compartiment aval, B : compartiment intermédiaire, C : compartiment amont).

Toutefois, cette diminution n'est significative que pour les individus les plus jeunes (KW = 29,7,  $p < 0,001$  et KW = 16,2,  $p < 0,001$  respectivement pour les anguilles < 150 mm et les anguilles de taille comprise entre 151 et 300 mm en 2013) (Figure 10). On ne note pas de différence significative des effectifs d'anguilles sédentarisées (> 300 mm) (tous les  $p > 0,05$ ).

#### b. L'année d'échantillonnage

Les abondances d'anguilles sont significativement plus élevées en 2013 qu'en 2010 (test de Wilcoxon,  $W = 298$ ,  $p = 0,008$ ). En effet, en moyenne 0,59 anguille ( $\pm 0,74$ ) étaient pêchées en 2010 par EPA, alors qu'en 2013, leur abondance moyenne augmente de 330 % ( $1,95 \pm 4,8$  anguilles par EPA) (Tableau 4). Toutefois, cette différence n'est significative que pour les anguilles de taille < 150 mm (test de Wilcoxon,  $W = 214$ ,  $p < 0,001$ ). On ne note pas de différence significative d'abondance pour les trois autres classes de taille (tous les  $p > 0,05$ ).

Toutes les tailles confondues, le nombre d'anguilles capturées par EPA n'est pas significativement différent en 2005 et 2013 (test de Wilcoxon,  $W = 29$ ,  $p = 0,81$ ). Toutefois, une comparaison par classe de taille met en évidence une augmentation de l'abondance des petites anguilles (< 150 mm) (test de Wilcoxon,  $W = 189$ ,  $p < 0,001$ ), une absence d'évolution des effectifs d'anguilles de 150 à 300 mm et supérieures à 450 mm (test de Wilcoxon, tous les  $p > 0,05$ ), ainsi qu'une diminution des effectifs d'anguilles de taille comprise entre 300 et 450 mm (test de Wilcoxon,  $W = 337$ ,  $p = 0,004$ ).

Tableau 4 : Tableau des abondances moyennes d'anguilles (nombre d'individu moyen par EPA) dans les annexes de la Loire aval en 2005, 2010, et 2013.

Classes de Tailles	Effectifs moyens / EPA en 2005	Effectifs moyens / EPA en 2010	Effectifs moyens / EPA en 2013
< 150	0,36	0,27	1,59
150 - 300	0,41	0,18	0,18
300 - 450	0,20	0,09	0,10
> 450	0,10	0,05	0,06
<b>TOTAL</b>	<b>1,05</b>	<b>0,59</b>	<b>1,95</b>

### c. La connectivité

En 2013, la comparaison des effectifs d'anguilles dans les stations en fonction de leur degré de connectivité à l'axe principal ne met pas en évidence de différence significative quel que soit la classe de taille prise en compte (test de KW, tous les  $p > 0,05$ ) (Figures 11 & 12) ; malgré la sélection de ce facteur par les GLM pour les individus les plus grands (> 300 mm). Le facteur connectivité semble donc être négligeable dans la répartition des anguilles aux seins des annexes hydrauliques.

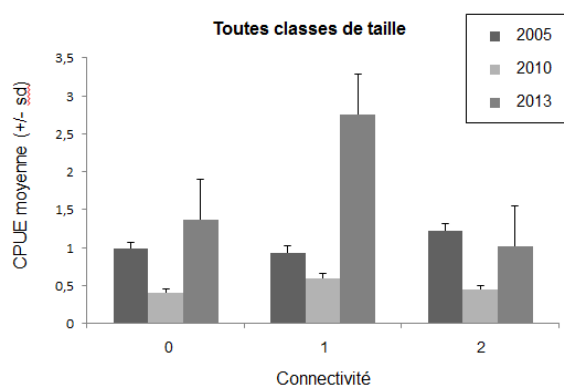


Figure 11 : Abondance moyenne (nombre d'individu moyen par EPA  $\pm$  sd) des anguilles selon le degré de connectivité des annexes (0 : déconnectée, 1 : intermédiaire, 2 : connectée).

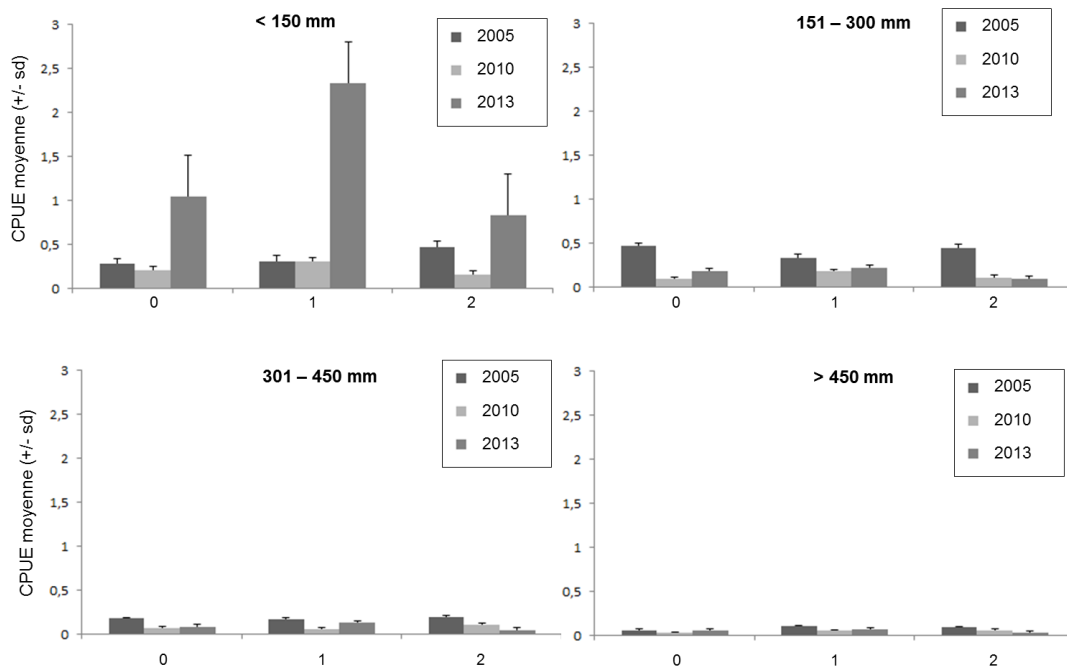


Figure 12 : Abondance moyenne (nombre d'individu moyen par EPA  $\pm$  sd) pour chaque groupe de classe de taille selon le degré de connectivité (0 : déconnecté, 1 : intermédiaire, 2 : connecté).

### 2.3.2 – Probabilité de présence en anguilles dans les annexes hydrauliques

#### 2.3.2.1 – Le front de colonisation

Lors de la campagne d'échantillonnage de 2013, des anguilles ont été retrouvées jusque dans les stations situées les plus en amont (Sablières de Turquant ; Figure 13), mais les jeunes anguilles constituant le recrutement de juin (< 150 mm) ne sont plus observées au-delà des Rosiers-sur-Loire, à 78 km de la limite d'influence tidale. Une seule station n'était pas colonisée par les anguilles (boire du Chapeau, à Saumur, à 99 km de la limite d'influence tidale).

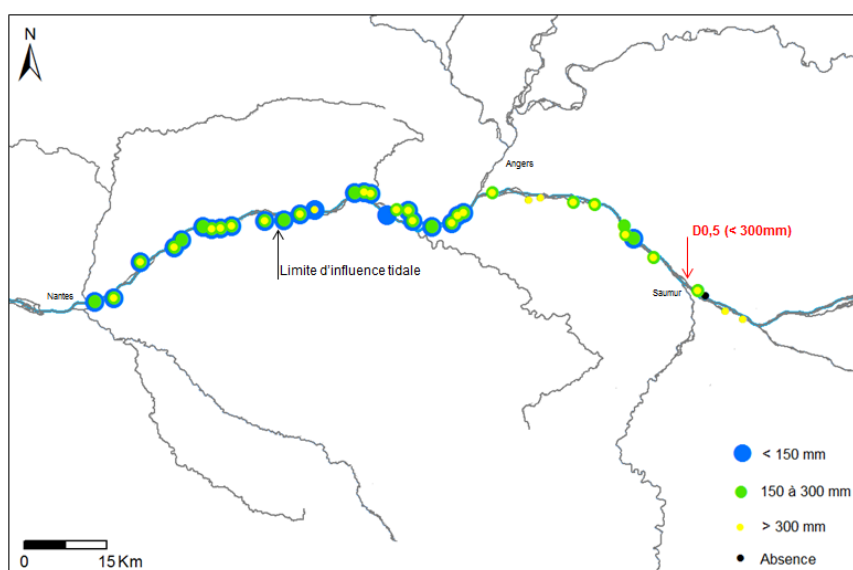


Figure 13 : Présences d'anguilles, par classes de tailles, dans les annexes hydrauliques de la Loire échantillonnées en 2013.

Nous pouvons noter que la  $D_{0,5}$  des anguilles < 300 mm sur les annexes de la Loire se situe en 2013 à 90 km de la limite d'influence tidale, au niveau de la ville de Saumur (Bras de l'île Offard, à Saumur ; Figures 13 et 14). Le front de colonisation a remonté vers l'amont de 30 km par rapport aux deux études précédentes en 2005 et 2010, où il était situé à environ 60 km de la limite d'influence tidale, au niveau de la boire de Gohier, à Blaison-Gohier.

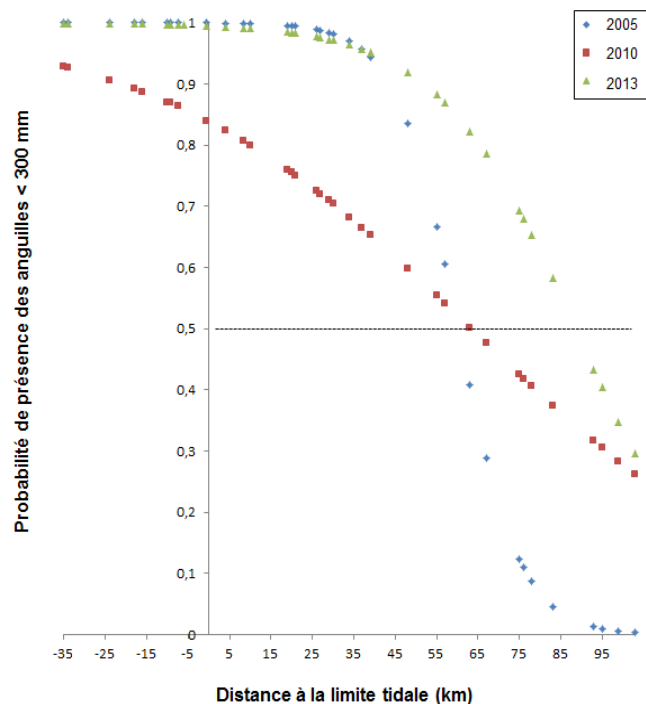


Figure 14 : Evolution des fronts de colonisation (anguilles < 300 mm) dans les annexes hydrauliques de la Loire en 2005 (bleu), 2010 (rouge) et 2013 (vert).

### 2.3.2.2 – Le recrutement fluvial

La probabilité de présence des jeunes anguilles (< 300 mm) en aval, qui avait diminué entre 2005 et 2010 est revenu au maximum en 2013 (tous les sites sont occupés) (Figure 14). En outre, le recrutement fluvial actuel (anguilles < 150 mm dans le compartiment aval) a significativement augmenté entre les hivers 2009-2010 et 2012-2013 (test de Wilcoxon,  $W = 298$ ,  $p=0,008$ ). Cette augmentation se retrouve aussi entre les recrutements des hivers 2004-2005 et 2012-2013 (test de Wilcoxon,  $W = 39$ ,  $p=0,019$ ), alors qu'aucune différence n'avait pu être mise en évidence entre les hivers 2004-2005 et 2009-2010 (test de Wilcoxon,  $W = 25$ ,  $p=0,16$ ). Tous ces résultats indiquent une augmentation significative du recrutement fluvial en 2013.

Le recrutement fluvial passé (anguilles de taille comprise entre 151 et 300 mm), qui avait significativement diminué entre 2005 et 2010 (test de Wilcoxon,  $W = 43$ ,  $p=0,008$ ), n'a pas significativement évolué entre 2010 et 2013 (test de Wilcoxon,  $W = 18$ ,  $p=0,25$ ). Ces résultats indiquent une forte diminution puis une stabilisation à de faibles recrutements fluviaux avant 2013.

## 2.4 – Discussion

Les annexes hydrauliques échantillonnées ont été sélectionnées en 2005, pour étudier une large gamme d'habitats pour l'ichtyofaune, étant plus ou moins connectées avec le chenal principal (Lasne *et al.*, 2007). Ces mêmes stations ont également été échantillonnées en 2010 et 2013, en adoptant le même protocole.

### 2.4.1 – La population en place dans les annexes hydrauliques en 2013

En 2013, l'abondance moyenne des anguilles en Loire aval a été multipliée par un facteur 3 par rapport à 2010. Cette augmentation est essentiellement due à l'important recrutement fluvial en 2013. Cette densité est comparable avec celles observées à l'aval des côtières bretons, région hydrographique proche géographiquement et aussi bien située pour le recrutement des jeunes anguilles sur la façade atlantique. En effet, dans les parties aval de ces bassins, les captures dépassent souvent 2 individus par EPA (Germis, 2009), résultat qui était jusqu'à maintenant rare en Loire aval.

Plusieurs facteurs sont susceptibles d'expliquer ce patron de distribution.

#### 2.4.1.1 – La distance à la limite tidale

La distance à la limite tidale est, dans nos analyses, le principal facteur permettant d'expliquer la distribution des anguilles en Loire aval. Cette observation est conforme aux connaissances sur cette espèce (e.g. Naismith & Knights, 1993 ; Lobon-Cervia *et al.*, 1995 ; Ibbotson *et al.*, 2002 ; Lasne *et al.*, 2008). De plus, en Loire aval, aucun ouvrage ne gêne la colonisation par les anguilles sur l'axe longitudinal (Lasne & Laffaille, 2008 ; Laffaille *et al.*, 2009). Ainsi, la distance parcourue par les jeunes anguilles dépend principalement de la dépense énergétique nécessaire pour atteindre un point donné du bassin (Bureau du Colombier *et al.*, 2007), qui se traduit par un gradient d'abondance des anguilles en fonction du gradient aval-amont. Nous observons ce patron de réponse en Loire aval, avec une diminution graduelle des abondances totales d'anguilles avec l'éloignement à la limite tidale. Toutefois, ce gradient n'est significatif que pour les plus jeunes individus (< 300 mm).

Ce résultat peut s'expliquer par des comportements différents en fonction des phases du cycle biologique de l'anguille. Les individus de taille supérieure à 300 mm sont majoritairement territoriaux et sédentaires (Laffaille *et al.*, 2005a). Par exemple, une étude des populations d'anguilles sur le Frémur, côtier breton, a mis en évidence que 95 % des anguilles marquées et recapturées pendant 4 ans se situaient dans un rayon de 100 m autour de leur emplacement de capture initial (Guillouët *et al.*, 2000). Toutefois, certains individus restent nomades, et utilisent les différentes zones accessibles entre la mer et l'eau douce, ce qui peut expliquer l'absence de gradient aval-amont chez les individus de taille supérieure à 300 mm (Feunteun *et al.*, 2003). A l'inverse, les jeunes anguilles sont beaucoup plus colonisatrices lorsqu'elles arrivent dans le bassin versant depuis l'estuaire. Le gradient observé pour les classes de tailles les plus petites serait donc dû à la diminution graduelle des effectifs au fur et à mesure qu'elles trouvent des habitats favorables et libres (Feunteun *et al.*, 2003), mais des

facteurs anthropiques, comme les prélèvements par la pêche peuvent également contribuer à ce gradient.

#### *2.4.1.2 - L'année*

Plusieurs paramètres peuvent varier d'une année à l'autre, et influencer les effectifs d'anguilles dans les annexes hydrauliques, comme par exemple les paramètres biotiques et abiotiques dans la mer des Sargasses. En effet, Bonhommeau *et al.* (2008) ont mis en évidence qu'il existait une forte corrélation entre le recrutement de civelles et la production primaire dans la mer des Sargasses. A court terme, la disponibilité de la nourriture (phytoplancton) influencerait fortement le taux de survie des larves, et par conséquent, l'amplitude du recrutement en estuaire. L'intensité de la production primaire dépend principalement de la température. Hors, la variation de température dans l'océan Atlantique entre 2010 et 2013 ne peut expliquer à elle seule le triplement du recrutement dans le bassin versant de la Loire. Par conséquent, il est fort peu probable que la forte augmentation du recrutement en 2013 s'explique uniquement par un meilleur taux de survie des larves dans la mer des Sargasses.

La baisse des captures autorisées de civelles entre les années 2005 et 2013, un des leviers d'action du plan de gestion Anguille pour restaurer les stocks d'anguilles, a très certainement été la principale raison de la hausse du recrutement en 2013. En effet, les quotas ont été atteints très rapidement en 2013 dans l'estuaire de la Loire (le 15 janvier 2013, avec toutefois une réouverture « flash » de la pêche à la civelle entre le 26 février et le 1<sup>er</sup> mars), ce qui a permis aux civelles de coloniser ensuite en masse la partie fluviale de l'estuaire.

Les conditions hydrologiques dans le bassin sont également variables en fonction des années, et pourraient expliquer la variabilité du recrutement. En effet, Acou *et al.* (2009) ont montré, sur le Frémur, que le recrutement annuel en civelles est corrélé positivement aux débits moyens mensuels en aval. En 2013, les débits, après la fermeture de la pêche, ont été très largement supérieurs aux deux années d'études précédentes (2557 m<sup>3</sup>/s en février 2013 ; 1142 m<sup>3</sup>/s en février 2010 ; 1114 m<sup>3</sup>/s en février 2005). Un fort débit entraîne un flux plus important d'eau douce en mer, et par conséquent un attrait plus important du bassin versant lorsque les civelles arrivent sur le plateau continental et commencent à pénétrer dans les estuaires. Ainsi, les civelles arrivées après l'arrêt de la pêche ont rencontrées des conditions optimales de colonisation.

L'augmentation du quota de capture lors de l'hiver 2013-2014, si elle n'est pas associée avec un fort débit hivernal et printanier, entrainera très certainement une chute importante du recrutement fluvial en Loire aval en 2014. Un suivi des effectifs à plus long terme permettra de préciser l'impact de ces deux principaux facteurs sur le recrutement fluvial en Loire aval.

#### *2.4.1.3 - Le degré de connectivité*

Sur la Loire, la colonisation longitudinale de l'axe n'est gênée par aucun ouvrage infranchissable, mais l'accès aux annexes hydrauliques est parfois géré par des ouvrages, qui rendent plus complexe l'étude de l'impact des variations de débit sur le niveau de connectivité des annexes, et le taux de colonisation des anguilles. L'amplitude de colonisation latérale dépend par conséquent de la



fréquence et de la durée de connexion des différentes annexes au cours d'eau principal (Lasne *et al.*, 2008). En 2013, malgré de forts débits dans les mois précédents l'étude, le degré de connectivité n'apparaît pas comme élément explicatif de l'abondance des anguilles dans les boires.

#### 2.4.2 – Comparaison des effectifs d'anguilles dans les annexes en 2005, 2010 et 2013 au moyen d'indices d'abondance

En 2013 sur la Loire, on peut observer une remontée du front de colonisation de 30 km vers l'amont et une augmentation significative du recrutement fluvial des anguilles par rapport aux années précédentes.

L'augmentation des probabilités de présence des jeunes anguilles (< 150 mm) à l'aval, avec une augmentation des probabilités de 0,92 à 1 entre 2010 et 2013, traduit une utilisation optimale des habitats par les jeunes anguilles. En effet, l'absence d'habitats disponibles à l'aval entraînerait une migration plus importante des civelles en amont, où elles trouvent des habitats disponibles non-colonisés par des anguilles plus âgées et sédentaires (La Bar *et al.*, 1987 ; McGovern & McCarthy, 1992 ; Baras *et al.*, 1998). C'est le patron de réponse que l'on observe actuellement sur la Loire, où nous avons mis en évidence une augmentation des effectifs et une remontée de 30 km du front de colonisation des jeunes anguilles (< 300 mm), à 90 km de la limite d'influence tidale. En effet, des années successives de fort recrutement en civelles aboutissent à une saturation de l'ensemble des habitats disponibles à l'aval, où règne une forte compétition entre les jeunes individus migrants à la recherche d'habitats disponibles et les individus sédentaires (Feunteun *et al.*, 2003), et par conséquent à une remontée du front de colonisation vers l'amont.

Hors, entre 2005 et 2010, une importante diminution des effectifs avait été mise en évidence (Besse & Laffaille, 2010), se traduisant par une diminution de la probabilité de présence des jeunes anguilles à l'aval (et ainsi une sous-utilisation des habitats en aval). Mais cette diminution des effectifs n'avait pas eu de conséquences en termes d'aire de répartition ; la limite du front de colonisation n'ayant pas varié entre les deux années, à 60 km de la limite tidale. Ainsi, même si la disponibilité de l'habitat semble être l'un des facteurs majeurs de « sédentarisation » des jeunes anguilles, d'autres paramètres entrent en jeu (e.g., la turbidité, la température (Arribas *et al.*, 2012), l'intensité lumineuse (Bardonnat *et al.*, 2005), l'intensité et la direction du vent, le rythme tidal (Elie & Rochard, 1994), la densité d'obstacles (Lasne & Laffaille, 2008)), et deux types de comportement s'opposent : certains individus auraient un comportement « pionnier » et migreraient vers l'amont indépendamment des conditions de densité locale et des conditions environnementales, alors que d'autres agiraient en « fondateurs », et migreraient vers l'amont jusqu'à ce qu'ils trouvent un habitat favorable et libre (Feunteun *et al.*, 2003). La proportion de ces deux types de stratégies est susceptible de varier d'une année à l'autre, et expliquer l'évolution des résultats sur les annexes de la Loire au cours des trois années d'étude.

Il est difficile de comparer ces résultats avec les résultats publiés dans la littérature. En effet, dans de nombreuses études, les suivis sont réalisés sur une dizaine d'années, et ne comprennent pas les données les plus récentes. De plus, les protocoles de capture des civelles sont variables (e.g., nos résultats ont été obtenus dans les annexes hydrauliques de la Loire, alors que dans la majorité des cas, des pêches en bateau sont effectuées au sein du lit majeur), comme les métriques utilisées pour

quantifier les flux ( $\text{Invid} \cdot 10^{-2} \cdot \text{m}^{-3}$  : Arribas *et al.*, 2012 ; CPUE - nombre de poisson par jour : Gollock *et al.*, 2011 ; captures (kg) : Bru *et al.*, 2009). Nous pouvons toutefois comparer nos résultats avec les tendances obtenues dans ces études. Ainsi, dans deux côtières bretons, le Frémur (Germis, 2012) et le Gouessant (Dumont, 2012), on note une diminution du nombre d'anguilles comptées dans les passes entre 2010 et 2011, alors que sur la Vilaine (Briand & Sauvaget, 2011), l'effectif est en augmentation depuis 2005.

A l'échelle Atlantique, les résultats des captures de civelles par les pêcheurs professionnels peuvent également fournir des tendances d'évolution de la population de civelles dans les cours d'eau. Ainsi, au Portugal, sur le Minho, seul fleuve où la pêche à la civelle est autorisée, on note une diminution de 50% des captures de civelles entre 2005 et 2010, et une augmentation en 2011 (2005 : 2,7 tonnes ; 2010 : 0,947 tonne ; 2011 : 1,085 tonne) (ICES, 2012). On observe la même tendance en analysant l'évolution des captures de civelles par les pêcheurs de loisir au Pays Basque Espagnol (2005 : 1181 kg ; 2010 : 614 kg ; 2012 : 1082 kg), ainsi que sur les côtières marocains, où on observe également une augmentation des captures au cours de la saison 2011-2012 (ICES, 2012). Si ces tendances se poursuivent en 2013, l'augmentation du recrutement fluvial mise en évidence par notre étude sur la Loire concernerait la plupart des cours d'eau Atlantiques. Il semblerait donc que les mesures de gestions adoptées au niveau européen aient des retombées positives sur la population d'anguille, et dans un premier temps, sur les jeunes individus. Il est toutefois nécessaire d'attendre les résultats du recrutement de 2013 et même 2014 sur ces cours d'eau pour conclure sur une réelle tendance, et confirmer cette évolution positive.

## 2.5 – Conclusion

Les résultats de la campagne 2013 mettent en évidence une augmentation globale des effectifs d'anguilles en Loire aval, augmentation essentiellement due aux importants effectifs de jeunes anguilles de taille inférieure à 150 mm. Cette augmentation se traduit en termes d'indices par une augmentation de la probabilité de présence des jeunes anguilles (< 300 mm) à la limite tidale, et par une remontée de la  $D_{0,5}$  de 30 km par rapport à l'année 2010.

Ces résultats confirment les tendances d'augmentation des effectifs de civelles depuis 2010 sur les fleuves Atlantiques, au Maroc, Portugal et en Espagne. Ils tendraient à souligner un effet positif des mesures adoptées au niveau européen pour protéger et reconstituer les stocks d'anguilles. Les premiers résultats du suivi de la population après la mise en place du Plan de Gestion Anguille dans le bassin Loire, et l'application des mesures de gestion qui l'accompagnent, sont donc encourageants. Ils ne sont à l'heure actuelle visibles uniquement sur les anguilles les plus jeunes, d'où l'intérêt d'un suivi sur le long terme pour confirmer l'impact positif de chacune des mesures sur l'ensemble des classes de tailles de l'espèce.

## 3 – Cartographie de la population d’anguille européenne dans le bassin versant de la Loire

Le règlement européen sur l’anguille prévoit une évaluation des mesures de gestion décrites dans le Plan National Anguille français. Hors, les réseaux existants de suivi de l’ichtyofaune dans le domaine continental (notamment de l’ONEMA dont une quantité importante de stations d’échantillonnage est située dans les zones amont, où les probabilités de capture d’anguille sont plus faibles) n’ont pas été construits dans un but de suivi de l’anguille (répartition spatiale des stations, protocole de pêche), et n’apportent donc pas l’ensemble des informations nécessaires au suivi de l’espèce.

Nous avons par conséquent mis au point un nouveau réseau de stations, le réseau anguille, permettant d’établir un état des lieux de la sous-population d’anguille dans le bassin versant de la Loire en 2013, qui pourra être utilisé durablement pour suivre l’évolution des densités d’anguille en Loire et ainsi évaluer l’impact des différentes mesures de gestion visant à protéger l’espèce.

### 3.1 – Méthodologie et protocole de pêche

#### 3.1.1 – Choix et localisation des stations

Quatre critères principaux ont été retenus pour sélectionner les stations.

Le premier est un critère de distance. Pour une répartition homogène des stations au sein du bassin versant, une distance de 15 km entre deux stations consécutives a été mise en place. Cette distance a toutefois été variable, compte tenu des contraintes du terrain, de la localisation et du débit des sous-affluents.

Le second critère concernait la distance de la station aux obstacles à la migration de l’anguille sur le cours d’eau. La station devait ainsi être éloignée, dans la mesure du possible, de ces obstacles (seuils, barrages, vannes), afin d’éviter les phénomènes d’accumulation des poissons à l’aval de ces derniers. Une distance de 500 mètres entre la station et l’obstacle a été fixée, mais cette distance a parfois dû être réduite compte tenu de la densité d’ouvrages sur certains cours d’eau (e.g., Loir, Sarthe).

Afin de permettre une prospection de la station à pied, la hauteur en eau devait être inférieure à 70 cm, et la zone d’étude devait s’étaler sur un minimum de 100 mètres.

Enfin, l’ensemble des autorisations administratives (autorisation de passage des propriétaires riverains, autorisation de pêche des Directions Départementales des Territoires concernées, autorisation exceptionnelle de pêche scientifique dans les réserves naturelles) devait être obtenues au préalable des pêches.

Au total, 268 stations, réparties sur 19 départements, sur la Loire et ses principaux affluents composent le réseau anguille et ont été échantillonnées au cours de l’été 2013 (Figure 15).

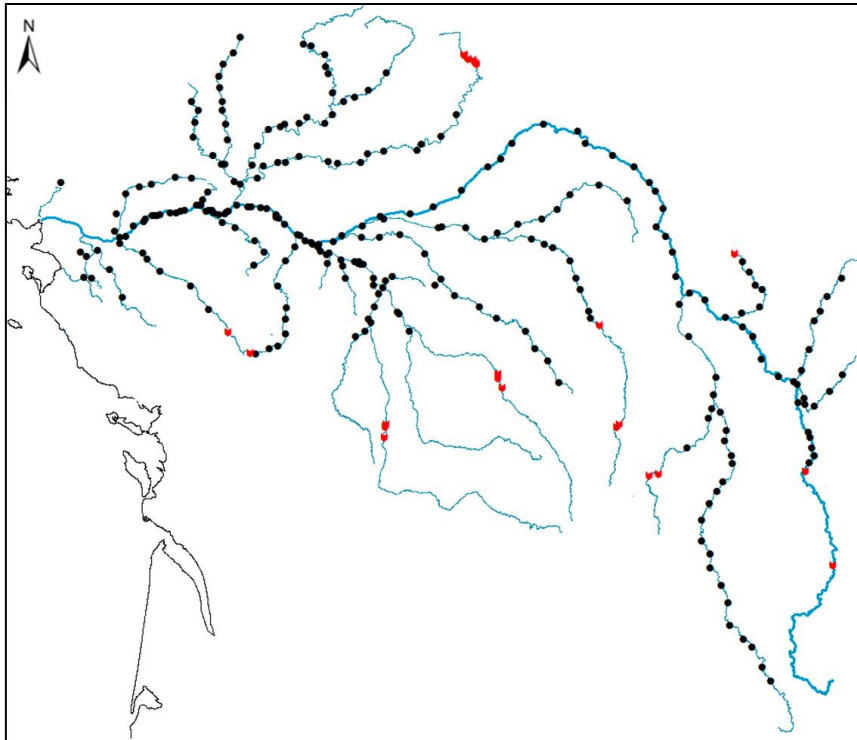


Figure 15 : Localisation des stations du réseau anguille (en noir : stations échantillonnées ; en rouge : obstacles infranchissables à l'anguille)

15 fédérations de pêche ont été partenaires de ce projet, ainsi que les deux antennes de Logrami (Figure 16).

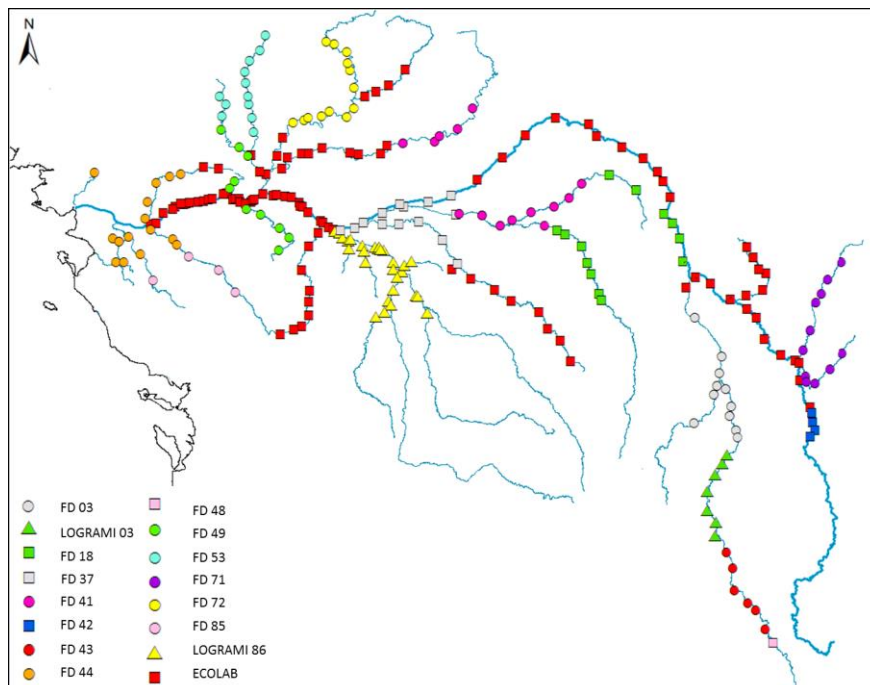


Figure 16 : Répartition des stations échantillonnées par organisme de pêche

Les stations situées le long de l'axe Loire ont été positionnées, autant que possible, dans des annexes hydrauliques (Figure 17). En effet, le chenal principal de la Loire n'est pas prospectable à pied, et l'échantillonnage des annexes nous permettait de comparer ces résultats à ceux de la première

partie de l'étude. De plus, les annexes hydrauliques sont des milieux favorables à la colonisation par l'anguille (voir première partie de l'étude). Les stations de l'axe Loire ont été exceptionnellement situées à la confluence entre la Loire et des sous-affluents lorsque les annexes hydrauliques étaient absentes ou asséchées.

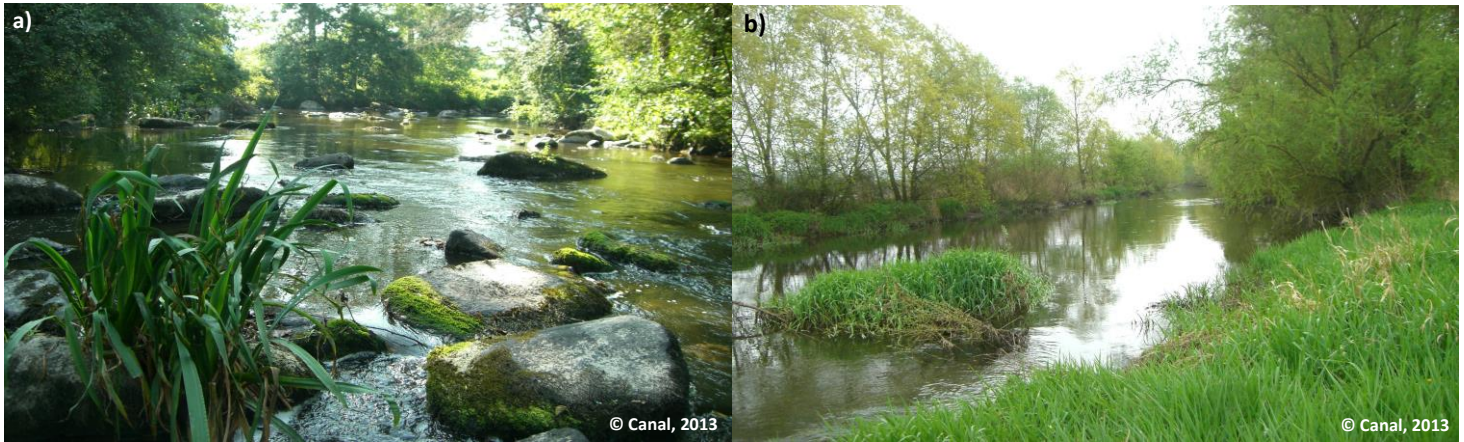


Figure 17 : Exemples de stations d'échantillonnage : (a) bras secondaire du Thouet, à Gourgé (Deux-Sèvres) ; (b) annexe hydraulique de la Loire, à Chambilly (Saône-et-Loire).

Les stations situées sur les affluents principaux de la Loire (Figure 17) ont été positionnées dans le lit majeur de ces cours d'eau lorsque la profondeur et le débit permettait une prospection à pied. A défaut, les confluences de ces affluents principaux avec de petits sous-affluents ont été échantillonnées.

### 3.1.2 - Protocole de pêche

Le protocole utilisé dans cette partie de l'étude a été sensiblement identique à celui utilisé en Loire aval (Protocole des Echantillonnages Ponctuels d'Abondance adapté pour l'anguille). Toutefois, le matériel de pêche électrique utilisé a été un appareil électrique portable fonctionnant sur batteries, de type Martin-pêcheur (®Dream électronique). Comme dans la première partie de l'étude sur les annexes hydrauliques en Loire Aval, 30 EPA ont été réalisés de façon systématique tous les trois mètres, sur une distance d'au-moins 100 mètres de cours d'eau, et les données ont été recueillies à l'aide de la même fiche de terrain.

## 3.2 – Analyse des données

### 3.2.1 – Etat des lieux

Afin de pouvoir comparer les sous-bassins entre eux, nous avons été contraints de regrouper certains affluents géographiquement proches, afin que chaque groupe ait un nombre homogène de stations. Les sous-bassins ont été composés de la façon suivante :

**Tableau 5 : Composition des 9 sous-bassins échantillonnés en 2013**

Sous-bassin	Rivières ou tronçons de la Loire	Nombre de stations
<b>Loire Aval</b>	Romme, Erdre, Brivet, Layon, Sèvre Nantaise, Tenu, Falleron	<b>28</b>
<b>Boires Loire Aval</b>	Boires de la Loire jusqu'à la confluence Loire - Maine	<b>24</b>
<b>Loire Moyenne</b>	Boires de Loire de la confluence Loire - Maine jusqu'à la confluence Loire - Allier	<b>36</b>
<b>Loire Amont</b>	Loire en amont de la confluence avec l'Allier, Arroux, Arconce et Aron	<b>33</b>
<b>Mayenne</b>	Mayenne et Oudon	<b>17</b>
<b>Sarthe</b>	Sarthe, Huisne et Loir	<b>34</b>
<b>Vienne – Thouet</b>	Thouet, Vienne et Creuse	<b>36</b>
<b>Cher – Indre</b>	Indre, Cher et Sauldre	<b>34</b>
<b>Allier</b>	Allier et Sioule	<b>26</b>

Nous avons par la suite comparé les densités d'anguilles entre ces différents sous-bassins par des tests de Kruskal-Wallis et de Wilcoxon.

### 3.2.2 – Modélisation des probabilités de présence de l'anguille dans le bassin versant

A partir de ces captures, nous avons élaboré un modèle statistique de prédiction des probabilités de présence des anguilles dans le bassin versant de la Loire. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel R, et plus particulièrement la librairie *biomod2* (Thuiller *et al.*, 2009). Cet outil permet de prédire la répartition des espèces, en tenant compte des relations espèces-environnement. Il permet par exemple de prédire la modification de l'aire de répartition des espèces sous différentes conditions environnementales (scénarios de changement climatique ou de modification de l'utilisation du sol), ou de tester la force de l'interaction entre la répartition d'une espèce et une variable prédictive de cette répartition.

Nous avons donc estimé les probabilités de présence de l'anguille dans les différentes stations du réseau en ajustant un modèle de régression linéaire généralisé (GLM). Nous avons testé l'effet de

plusieurs variables sur la distribution de l'espèce (distance à la limite tidale, nombre de barrages franchissables à l'aval, superficie du bassin drainé en amont), puis sélectionné les variables les plus structurantes de cette distribution.

### 3.2.3 – Comparaison du modèle « Réseau Anguille » et du modèle EDA 2.X

Afin d'évaluer et de valider notre modèle, nous avons comparé nos résultats à ceux du modèle EDA 2.X (Eel Density Analysis) (Jouanin *et al.*, 2012 ; Figure 18).

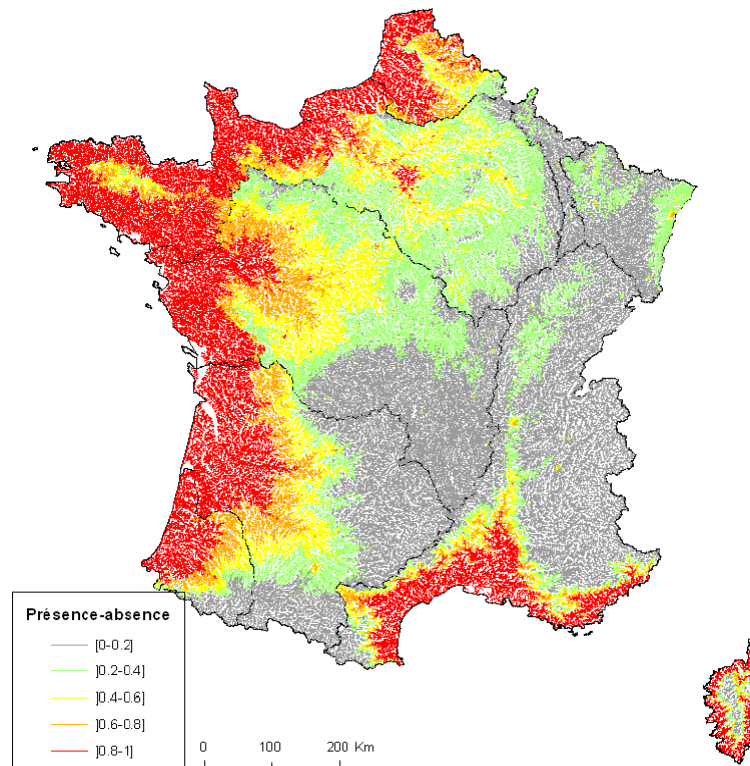


Figure 18 : Prédications du modèle de présence-absence (de 0 : absence à 1 : présence) sur le réseau RHT pour le mois de septembre 2009

EDA 2.x (Eel Density Analysis) est un outil qui permet de prédire les densités d'anguilles jaunes et l'échappement d'anguilles argentées, basé sur le Réseau Hydrographique Théorique (Pella *et al.*, 2012). Le principe de cette approche est de relier les densités d'anguilles jaunes observées lors de pêches électriques à différents paramètres : méthodes d'échantillonnage, conditions environnementales (distance à la limite tidale, température, altitude, ...), conditions anthropiques (obstacles, occupation du sol, ...) et dimension temporelle, et d'extrapoler les densités d'anguilles jaunes dans chaque tronçon du réseau hydrographique en appliquant un modèle statistique permettant de calculer l'abondance totale de la population d'anguilles jaunes en multipliant ces densités par la surface en eau des tronçons (Jouanin *et al.*, 2012).

Nous avons comparé les probabilités de présence d'anguilles, toutes classes de tailles confondues, de notre modèle à celles du modèle EDA au moyen d'un test de Student sur des données appariées. Nous avons également testé la corrélation entre ces deux modèles par le biais d'un test de corrélation de Spearman.

## 3.3 – Résultats

### 3.3.1 – La population en place en 2013

Sur les 231 stations échantillonnées en 2013, 516 anguilles ont été dénombrées, en plus des 2130 anguilles déjà dénombrées dans les 37 stations situées dans les boires, en Loire Aval (Tableau 6).

Tableau 6 : Effectifs d'anguille capturés dans les différents cours d'eau en 2013 par classes de taille.

Dpt	Cours d'eau	Nbre de stations	Organisme	< 150	150-300	301-450	> 450	TOTAL
44	Brivet	01	FD 44	9	0	0	0	9
44	Sèvre Nantaise	03	FD 44	68	32	8	0	108
85	Sèvre Nantaise	03	FD 85	1	4	6	7	18
44	Erdre	05	FD 44	11	17	5	0	33
49	Erdre	02	Ecolab	0	0	0	2	2
44	Falleron	01	FD 44	4	3	0	0	7
85	Boulogne	01	FD 85	0	0	0	0	0
44	Boulogne	01	FD 44	0	0	1	0	1
44	Tenu	02	FD 44	0	2	0	0	2
44	Acheneau	02	FD 44	11	10	3	0	24
49	Layon	05	FD 49	4	13	2	3	22
49	Romme	02	FD 49	0	1	0	3	4
49	Oudon	03	FD 49	0	1	0	2	3
53	Oudon	03	FD 53	0	0	0	2	2
53	Mayenne	09	FD 53	0	2	5	7	14
49	Mayenne	02	Ecolab	0	1	1	2	4
49	Sarthe	03	Ecolab	0	5	6	17	28
72	Sarthe	13	FD 72	0	0	0	2	2
72	Huisne	04	Ecolab	0	0	0	4	4
49	Loir	03	Ecolab	0	5	4	1	10
72	Loir	06	Ecolab	0	19	9	5	33
41	Loir	05	FD 41	0	0	0	0	0
49	Thouet	02	Ecolab	0	3	2	3	8
79	Thouet	07	Ecolab	0	2	3	9	14
49	Loire	01	Logrami 86	0	1	1	2	4
37	Vienne	18	Logrami 86	28	7	7	6	48
86	Vienne	09	Logrami 86	0	1	1	0	2
37	Indre	06	FD 37	0	2	4	0	6
36	Indre	08	Ecolab	0	1	2	6	9
37	Cher	02	FD 37	0	0	0	1	1
41	Cher	04	FD 41	0	0	2	10	12
18	Cher	07	FD 18	0	0	0	1	1
41	Sauldre	05	FD 41	0	0	0	5	5
18	Sauldre	02	FD 18	0	0	0	0	0
58	Allier	01	Ecolab	0	0	0	10	10
03	Allier	08	FD 03	0	0	1	0	1
63	Allier	07	Logrami 03	0	0	0	0	0
43	Allier	06	FD 43	0	0	0	0	0
48	Allier	01	FD 48	0	0	0	0	0
03	Sioule	03	FD 03	0	0	1	1	2
58	Aron	06	Ecolab	0	0	0	1	1
71	Arroux	06	FD 71	0	0	0	0	0



71	Arconce	05	FD 71	0	0	0	0	0
37	Loire	06	FD 37	0	0	0	0	0
41	Loire	03	Ecolab	0	1	2	16	19
45	Loire	08	Ecolab	0	2	3	6	11
58	Loire	05	Ecolab	0	0	0	17	17
18	Loire	01	Ecolab	0	0	0	0	0
18	Loire	04	FD 18	0	3	0	2	5
03	Loire	03	Ecolab	0	0	0	8	8
71	Loire	04	Ecolab	0	0	0	2	2
42	Loire	04	FD 42	0	0	0	0	0

Les densités d'anguilles dans les neuf sous bassins étudiés sont significativement différentes (test de Kruskal-Wallis,  $KW = 93,2$ ,  $p < 0,001$  ; Figure 19). Le sous bassin «Boires Loire Aval» abrite les densités d'anguille les plus élevées (tests de Wilcoxon, tous les  $p < 0,001$ ), puis on trouve le sous bassin «Loire Aval» (tests de Wilcoxon, tous les  $p < 0,001$ ). Les 5 sous bassins Mayenne, Sarthe, Vienne-Thouet, Cher-Indre et Loire moyenne ont été regroupés car ils ne présentent pas de différences significatives. La densité d'anguille dans ce groupe de sous bassins est inférieure à celle dans les boires et en Loire Aval (tests de Wilcoxon, tous les  $p < 0,001$ ), mais supérieure au deux derniers sous bassin, Allier et Loire Amont, groupe au sein duquel la densité d'anguille n'est pas significativement différente.

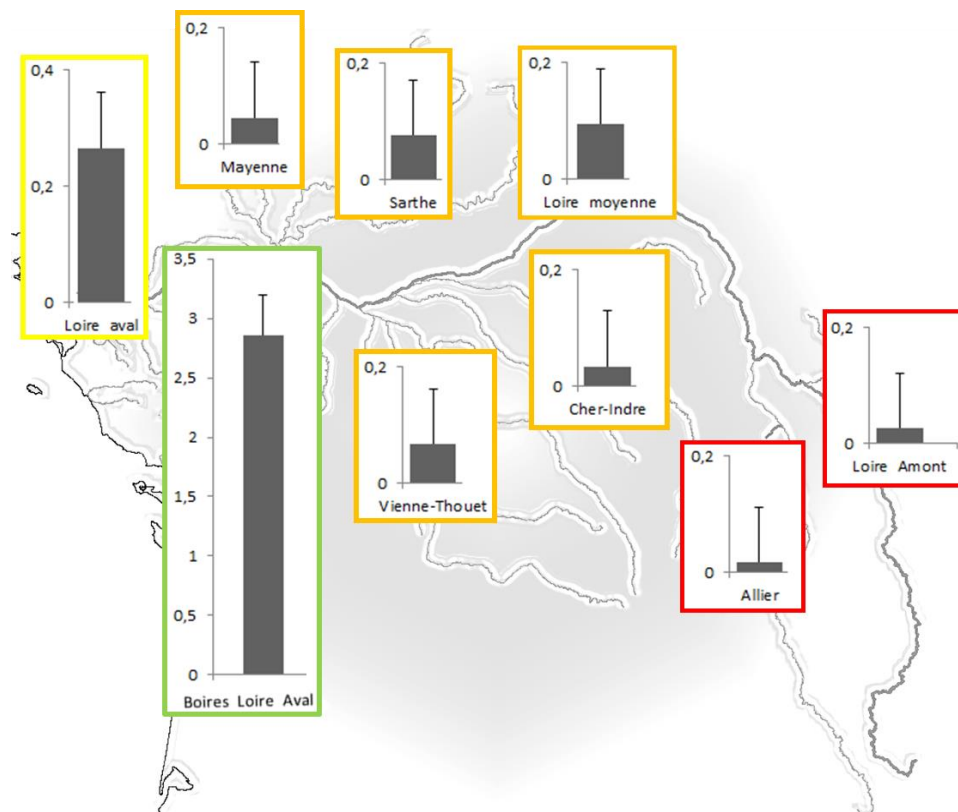


Figure 19 : Répartition des densités d'anguilles (nombre moyen d'anguille par EPA  $\pm$  sd), toutes classes de tailles confondues, en fonction des sous-bassins versants (les différentes couleurs indiquent des différences significatives)

Les anguilles les plus jeunes (< 150 mm) se retrouvent préférentiellement dans la partie aval du bassin, dans les affluents et les boires de Loire Aval (Figure 20). Cette classe de taille est absente des affluents situés un peu plus en amont, tels que la Mayenne, la Sarthe, le Cher et l'Indre. Toutefois, on retrouve cette classe de taille en densité relativement importante dans le bassin de la Vienne. Nous pouvons relier ce phénomène au nombre de barrages situés à l'aval des stations (Figure 21). En effet, les bassins versants de Mayenne, Sarthe et Cher sont les trois bassins dans lesquels la densité de barrage est la plus élevée, alors que le bassin Vienne, situé dans le même secteur géographique, présente une densité beaucoup plus faible d'ouvrages, ce qui pourrait expliquer la présence de jeunes anguilles dans ce secteur, et leur absence dans les bassins dans lesquels la densité d'ouvrages est élevée.

Quelques jeunes individus (< 150 mm) sont encore présents en Loire Moyenne, bassin dans lequel on retrouve également une densité relativement importante d'individus colonisateurs (taille inférieure à 300 mm), alors qu'on ne rencontre plus ces deux classes de tailles au-delà, en amont.

A l'inverse, on observe une augmentation de la densité d'anguilles plus âgées (de taille supérieure à 300 mm) dans les affluents ainsi qu'en Loire amont en comparaison aux boires et affluents de Loire Aval. Les zones amont n'abritent que ces deux classes de taille, et sont par conséquent composées de populations relictuelles.

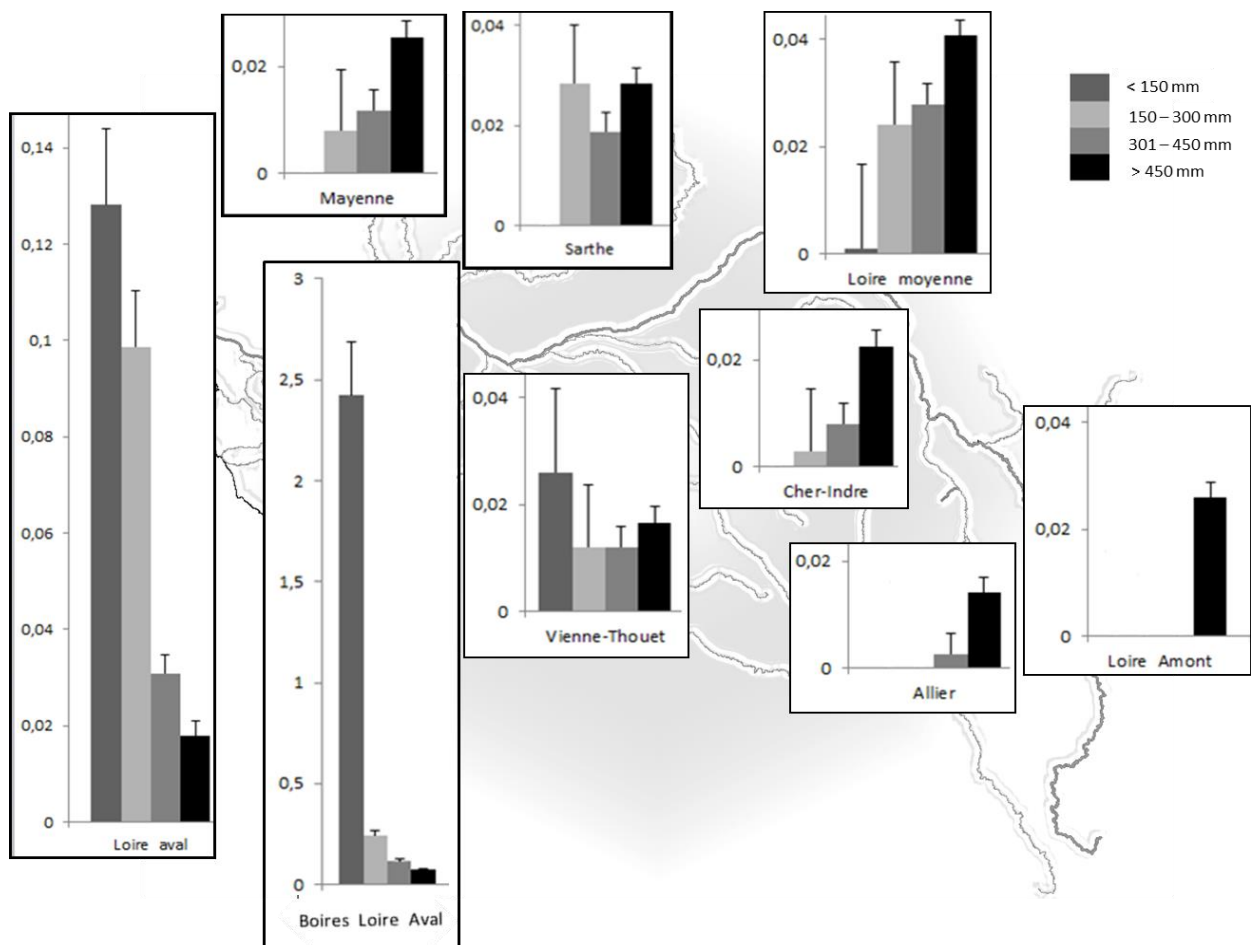


Figure 20 : Répartition des densités d'anguilles (nombre moyen d'anguille par EPA ± sd), par classes de tailles, au sein des sous-bassins versants.

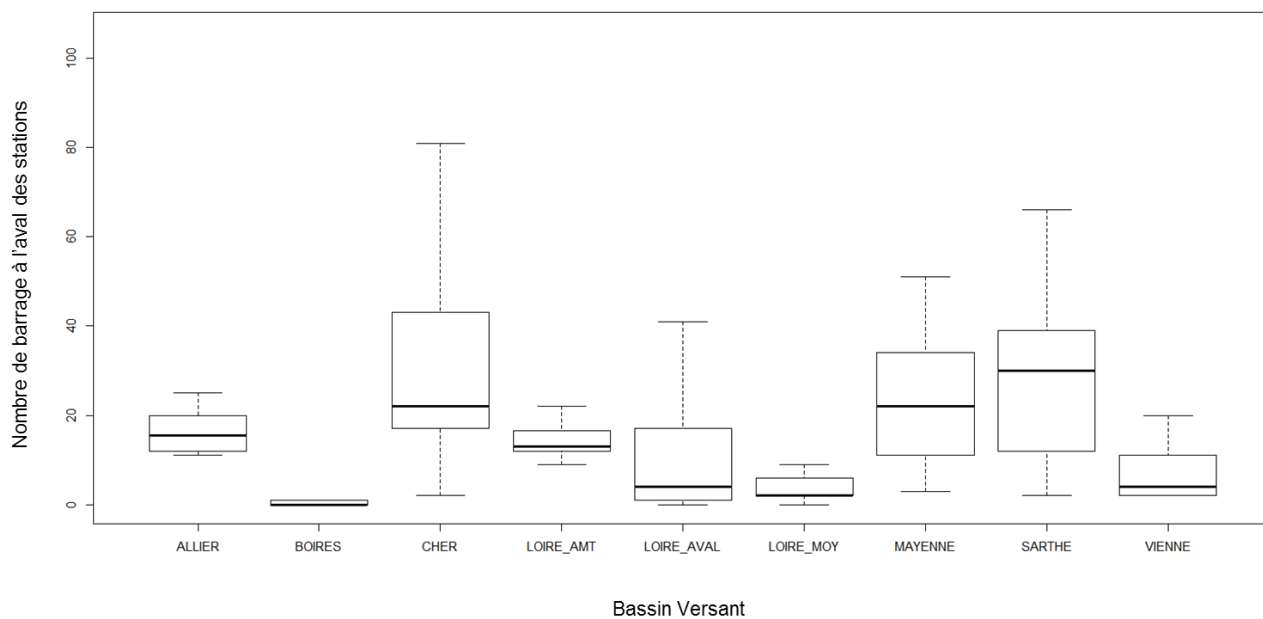


Figure 21 : Nombre moyen de barrage à l'aval des stations dans les différents sous bassin versant (données Onema).

### 3.3.2 – Modélisation des probabilités de présence de l’anguille dans le bassin versant

L’étude des différentes variables susceptibles d’influencer la distribution de l’anguille a mis en évidence que seule la distance à la limite tidale était une variable structurante dans notre étude. Ce résultat confirme les résultats que nous avons obtenus dans la première partie de l’étude, où nous avons démontré une diminution des densités d’anguille de l’aval vers l’amont. Cette densité diminue également sur les principaux affluents de la Loire, de l’aval vers l’amont (Figure 22).

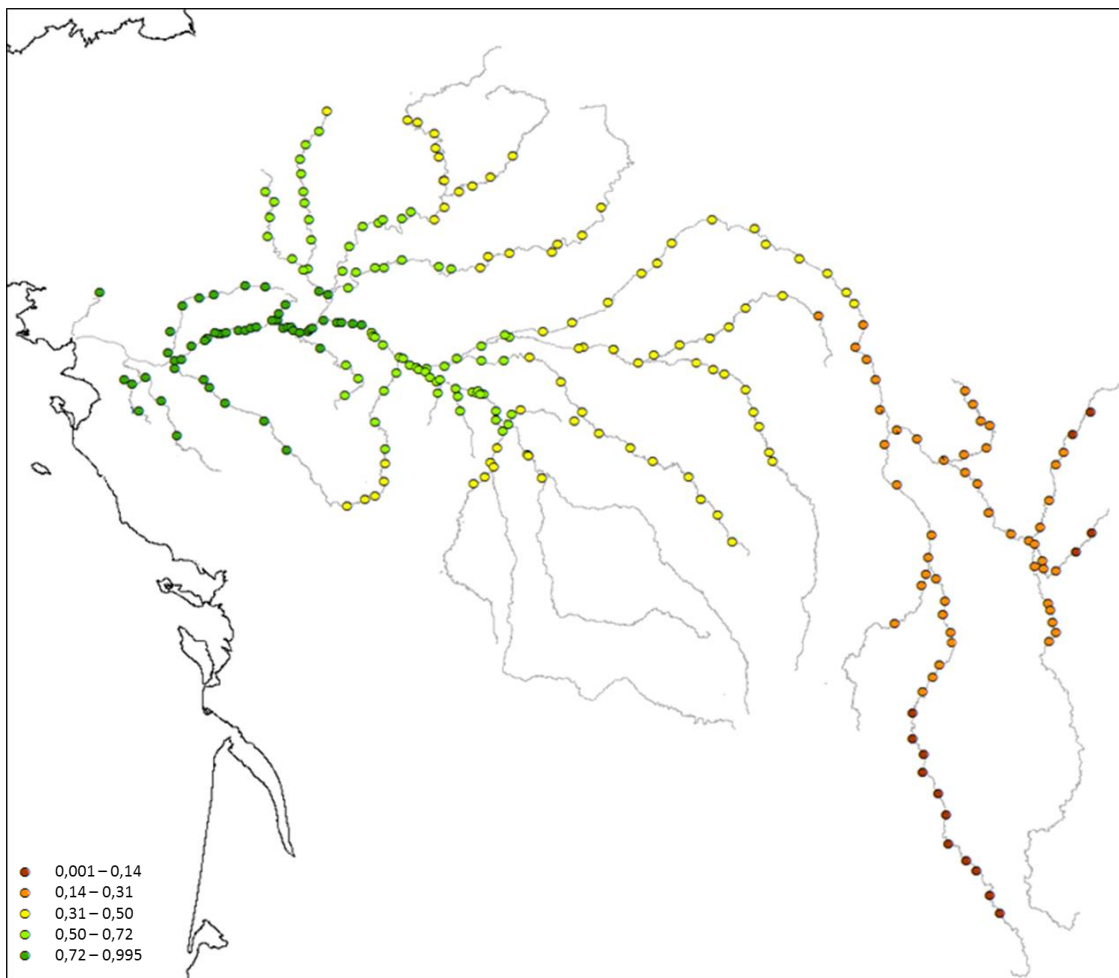


Figure 22 : Probabilités de présence (de 0 : absent à 1 : présent) de l'anguille (toutes classes de tailles confondues) selon le modèle Réseau Anguille.

Lorsqu'on s'intéresse à la répartition de l'anguille par classe de tailles, on constate que la probabilité de présence des jeunes anguilles (< 150 mm) est très élevée à l'aval du bassin, et diminue très rapidement en remontant vers l'amont. Dès la Loire moyenne, la probabilité de présence de ces jeunes individus chute à des valeurs inférieures à 14%. La probabilité de présence de ces jeunes individus est également très faible dans les parties amont des affluents.

On trouve le même modèle de réponse pour les individus de tailles comprises entre 150 et 300 mm. Malgré le fait qu'ils remontent plus en amont dans le bassin versant, leur probabilité de présence est faible en Loire amont, ainsi qu'à l'amont de certains des affluents du réseau, tels que l'Indre ou le Cher.

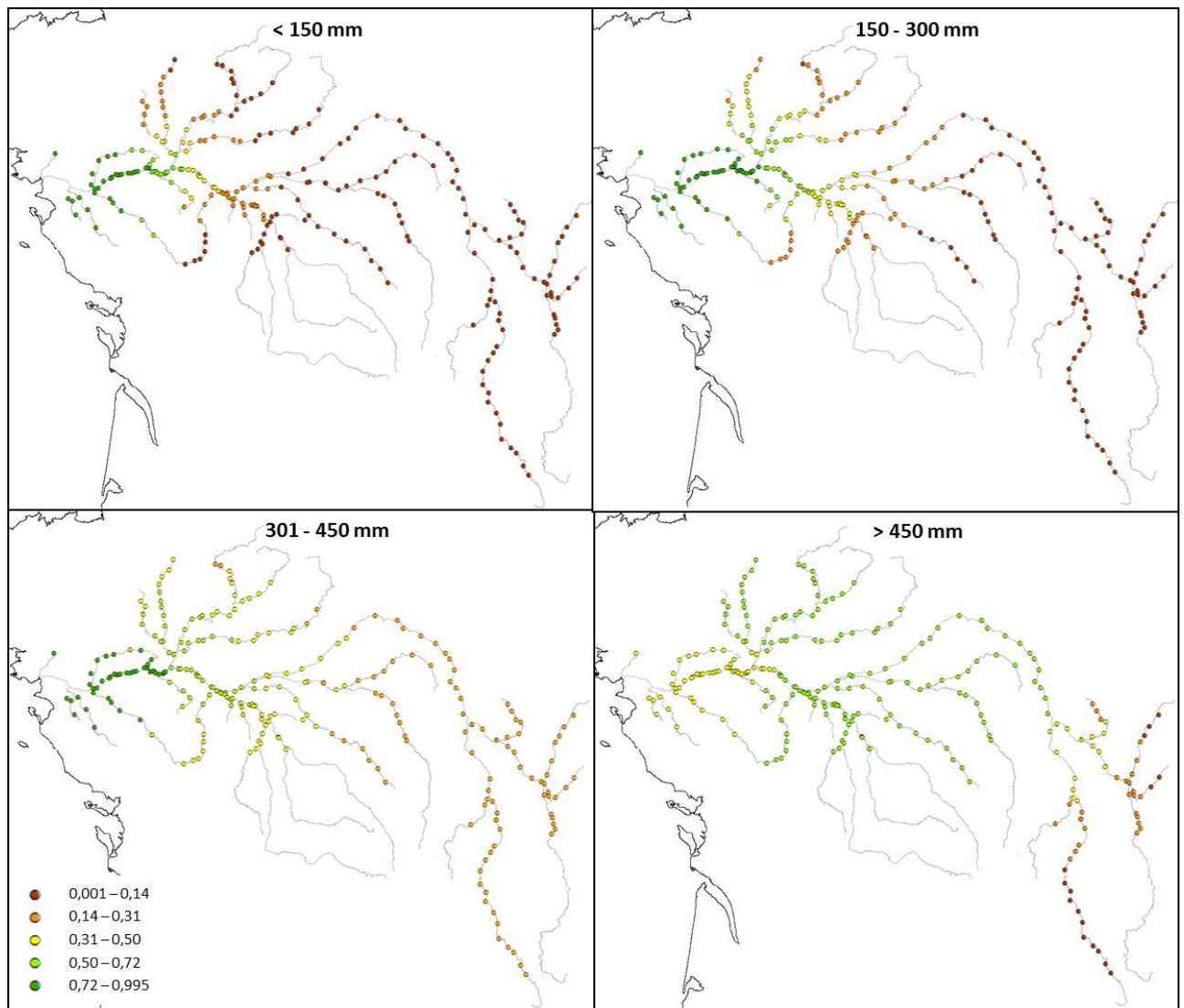


Figure 23 : Répartition des probabilités de présence (de 0 : absent à 1 : présent) des anguilles selon le modèle de distribution issu du Réseau Anguille, par classe de taille (< 150 mm, 150-300 mm, 301-450 mm, > 450 mm)

Concernant les individus de tailles comprises entre 301 et 450 mm, leur probabilité de présence est élevée dans la partie aval du bassin, et elle diminue en remontant vers les zones amont de la Loire et de ses affluents, mais elle reste relativement élevée (entre 14 et 31%), en comparaison avec les autres classes de tailles.

Enfin, la probabilité de présence des individus les plus grands (> 450 mm) est moins élevée à l'aval du bassin versant, comparativement aux autres classes de tailles (elle est comprise entre 31 et 50 % pour les anguilles > 450 mm ; entre 72 et 99,5% pour les trois autres classes de tailles). Cette probabilité de présence augmente dans la partie moyenne du bassin, puis diminue dans la partie amont, sur la Loire et l'Allier.

### 3.3.3 – Comparaison du modèle Réseau Anguille et du modèle EDA 2.X

La comparaison des probabilités de présence des anguilles dans le modèle EDA et le modèle Réseau Anguille met en évidence une différence significative (test de Student sur des données appariées,  $t=-12,8$ ,  $p<0,001$ ). En effet, nous pouvons remarquer que le modèle Réseau Anguille a tendance à légèrement sous-estimer la probabilité de présence de l'anguille, notamment dans la partie centrale du bassin versant (Figure 24).

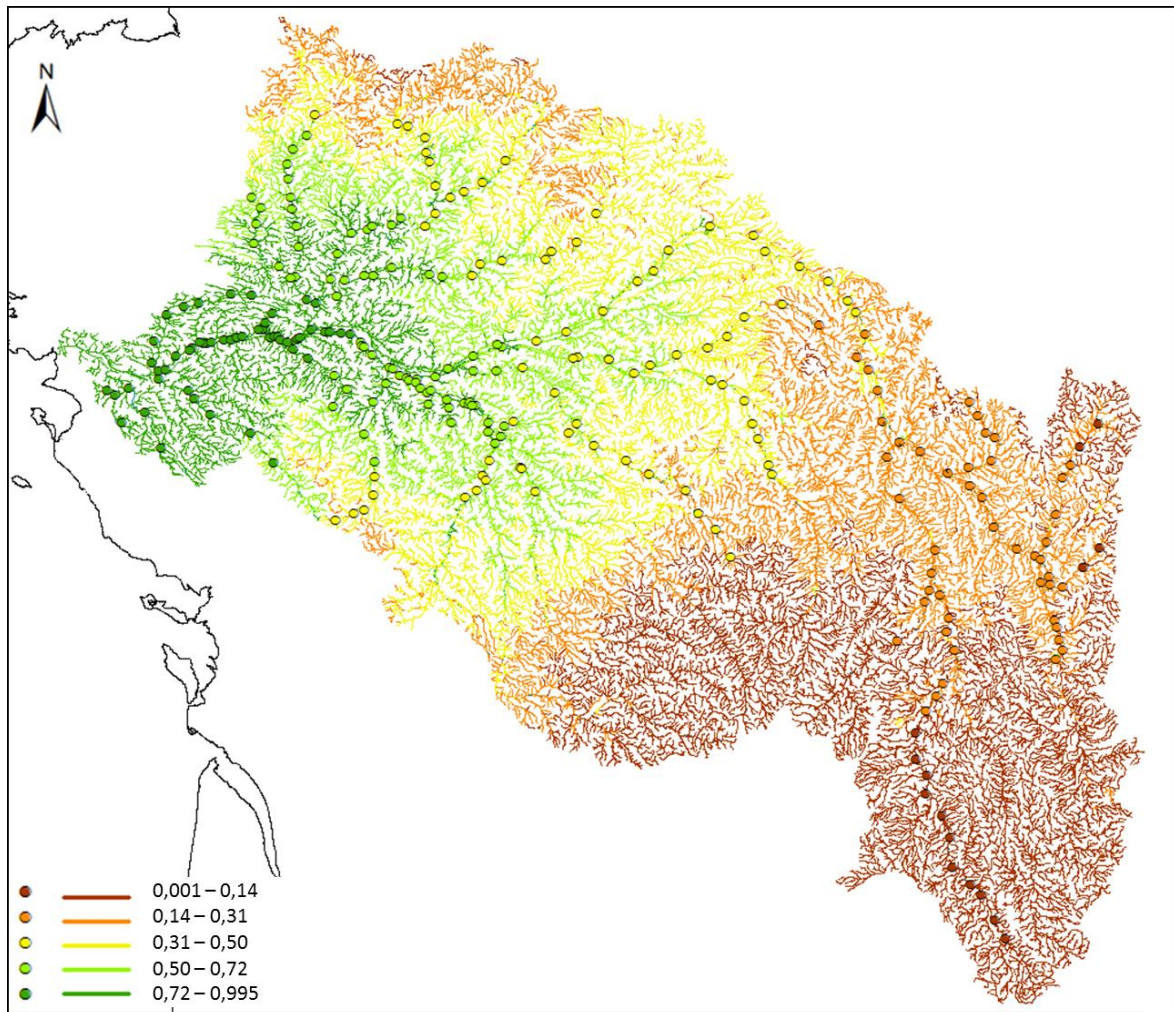


Figure 24 : Comparaison des probabilités de présence (de 0 : absent à 1 : présent) des anguilles, toutes classes de tailles confondues, du modèle Réseau Anguille (points) et du modèle EDA 2.X (linéaire).

Toutefois, malgré leurs différences, ces deux modèles sont fortement corrélés (corrélation de Spearman,  $r=0,98$ ,  $p<0,001$ ) indiquant ainsi les mêmes tendances.

## 3.4 - Discussion

### 3.4.1. Une densité d'obstacles qui modifie la structure en taille de la population dans certains affluents

L'analyse cartographique de la répartition des densités d'anguilles dans le bassin versant de la Loire a permis de mettre en évidence une population jeune et abondante, dominée par des individus de taille inférieure à 300 mm en Loire Aval, ainsi que des populations relictuelles, dominées par des individus âgés, en densités faibles, en Loire amont, Allier et à l'amont de certains affluents.

La répartition de l'espèce ne suit pas toujours ce modèle. En effet, Laffaille *et al.* (2003) ont mis en évidence, dans des petits bassins versants côtiers, qu'il était possible d'avoir une augmentation de la densité des anguilles en allant vers l'amont, la totalité du bassin étant colonisé par l'espèce. Hors, notre étude est basée sur un bassin versant très étendu, le bassin de la Loire, et dans ces grands bassins, le modèle de répartition longitudinal de l'espèce, avec une augmentation de la taille moyenne des anguilles ainsi qu'une diminution de leur densité en allant vers l'amont est admis, et conforme aux connaissances de l'espèce. Il a par exemple été mis en évidence sur la Tamise (Naismith & Knights, 1988), ou le Severn et l'Avon (White & Knights 1997).

Nous avons également mis en évidence des densités inférieures d'anguilles dans les affluents, comparativement à l'axe de la Loire. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la densité des ouvrages limitant la migration de l'espèce dans certains sous bassins versants étudiés. En effet, les bassins de la Mayenne, de la Sarthe et du Cher sont les trois bassins qui comportent la densité la plus forte d'obstacles à la migration de l'anguille. Si on compare la densité et la composition de la population d'anguilles dans ces bassins avec un bassin situé dans la même zone géographique, tel que le bassin de la Vienne, qui comporte une densité d'obstacles inférieure, on constate que les densités ne sont pas significativement différentes entre ces 4 sous bassins, mais que la composition de la population diffère. En effet, sur le bassin de la Vienne, on retrouve des jeunes anguilles, de taille inférieure à 150 mm en densité relativement importantes, alors que cette classe de taille est totalement absente des trois autres sous bassins. La densité d'ouvrage semble par conséquent influencer aussi la structure en taille de la population d'anguilles. Nos résultats confirment ceux d'une précédente étude qui avait montré que la densité d'obstacles à la migration de l'anguille dans le bassin versant de la Maine entraînait un retard à la migration de l'espèce vers l'amont comparativement au reste du bassin versant de la Loire, et modifiait ainsi la structure en taille de la population (Lasne et Laffaille, 2008). Un retard à la migration des jeunes individus imputée à la densité des obstacles sur le cours d'eau, entraînant une modification de la structure en taille de la population a également été observé sur la Vilaine (Briand *et al.*, 2005).

Cette importante densité d'obstacle gêne la colonisation de nouveaux habitats propices à l'espèce, entraînant une réduction de son aire de répartition, et l'accumulation d'individus bloqués dans leur migration à l'aval de ces obstacles qui en résulte pourrait modifier les taux de croissance des individus (Feunteun *et al.*, 1998) et augmenter localement le taux de mortalité (Holmgren, 1996).

Ainsi, la répartition de l'anguille dans le bassin versant dépend de la densité d'individus qui pénètre dans l'estuaire, comme nous l'avons déjà mis en évidence dans la première partie de l'étude (plus le

nombre de jeunes individus entrant dans l'estuaire est important, plus la probabilité de coloniser des territoires situés en amont augmente), mais elle dépend également de la connectivité longitudinale de la rivière (Eikaas & MacIntosh, 2006), qui modifie la structure en taille de la population. Il est par conséquent capital de rétablir cette connectivité longitudinale, par l'arasement des seuils inutilisés, la mise en place de passes à poissons (Laffaille *et al.*, 2005b) ou par une meilleure gestion des barrages (Laffaille *et al.*, 2007), qui représente l'une des principales causes de déclin de l'anguille à l'échelle des sous bassins versants (Domingos *et al.*, 2006).

### 3.4.2. Un effet « barrage » masqué par l'importance de la distance à la limite tidale

L'étude des variables influençant la répartition de l'anguille par la modélisation statistique des présences-absences de l'espèce a permis de mettre en évidence l'importance de la distance à la limite tidale dans la répartition de l'anguille au sein du bassin versant de la Loire. L'utilisation de ce type de modèle est un bon moyen de visualisation de la variabilité de la distribution de l'espèce à l'échelle du bassin versant (Lasne & Laffaille, 2008), et le nombre de stations important permet de gommer les éventuels faux-négatifs (i.e., anguille non détectée mais présente en faible densité).

La modélisation des probabilités de présence des anguilles par classes de taille a notamment mis en évidence une probabilité plus faible de trouver les individus les plus âgés dans les zones situées à l'aval, alors que la probabilité est élevée d'y rencontrer des individus de taille comprise entre 300 et 450 mm. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que les zones aval sont majoritairement colonisées par des mâles (Lasne & Laffaille, 2008), dont la migration de reproduction a lieu plus précocement que pour les femelles, à une taille comprise entre 300 et 450 mm. Ainsi, les femelles auraient plus de temps pour coloniser les zones amont (Laffaille *et al.*, 2006 ; Melia *et al.*, 2006), et la probabilité de les retrouver à l'aval serait par conséquent plus faible. Le modèle montre également une plus importante probabilité de présence des jeunes individus à l'aval. Il confirme ainsi les résultats que nous avons obtenus par l'étude précédente. Dans le modèle, l'influence importante de la distance à la limite tidale masque les autres éléments susceptibles d'influencer la distribution à une échelle plus locale, telle que la densité d'obstacle.

La comparaison de notre modèle issu du Réseau Anguille avec le modèle EDA (Jouanin *et al.*, 2012) met en évidence des différences, et notamment une sous-estimation des probabilités de présence dans la partie centrale du bassin par le modèle du Réseau Anguille. Toutefois, la corrélation entre ces deux modèles est très forte indiquant qu'ils montrent les mêmes tendances. Cette différence observée entre les deux modèles pourrait être due à la différence temporelle des deux séries de données sur lesquelles ils sont basés. En effet, le modèle EDA est calibré sur des séries de pêches s'étalant jusqu'en 2009, alors que notre modèle est basé sur des résultats de 2013. Hors, nous avons mis en évidence dans la première partie de l'étude que la dimension temporelle influençait, de façon importante, tant la densité que la répartition des anguilles. Dès que les données 2013 de l'Onema seront disponibles, nous pourrons alors comparer de façon plus précise les deux méthodes.

De plus, les protocoles de recueil des données sont également très différents. Le modèle EDA étant calibré sur des données de l'ONEMA, il se base sur des pêches complètes, alors que notre modèle Réseau Anguille est basé sur des échantillonnages ponctuels d'abondance, et par conséquent, un protocole plus rapide et moins onéreux à mettre en place. Le modèle Réseau Anguille semble donc représenter un bon compromis en termes d'effort d'échantillonnage, de coût, et de rapidité de mise en œuvre pour évaluer l'étendue de l'aire de répartition de l'anguille.



## 4 – Bilan Général

### *Une augmentation des effectifs de jeunes anguilles en 2013*

L'étude de la population d'anguilles dans les boires de Loire Aval en 2013, et la comparaison avec les résultats de 2005 et 2010 a permis de mettre en évidence une nette augmentation des effectifs de jeunes anguilles en 2013, essentiellement des anguilles de taille inférieure à 150 mm.

Cette étude a également démontré une remontée du front de colonisation des individus de taille inférieure à 300 mm de 30 km vers l'amont, soit une augmentation de l'aire de répartition des individus colonisateurs vers l'amont.

Ces conclusions peuvent s'expliquer par la conjonction d'une atteinte précoce des quotas civelles, entraînant une fermeture de la pêche laissant libre la colonisation du bassin par les individus arrivés après cette fermeture, et des débits très élevés en 2013, notamment avec une crue très importante au mois de février, et une série de crues de printemps, qui ont d'une part attiré les jeunes anguilles dans l'estuaire, puis ont favorisé leur colonisation vers l'amont dans le bassin versant.

### *Une population jeune à l'aval, une population relictuelle à l'amont et dans certains affluents*

La cartographie de la population actuelle d'anguilles a permis de mettre en évidence une population jeune en Loire aval, largement dominée par des individus de taille inférieure à 150 mm, et des populations relictuelles dans les zones amont, de la Loire ou de ses affluents (population formée uniquement d'individus âgés, de taille supérieure à 300 mm). Cette étude de la répartition spatiale de l'anguille souligne le risque d'une disparition rapide de l'espèce de ces zones amont.

Pour parer à ce phénomène, et favoriser la présence de l'espèce dans le bassin de la Loire, il est nécessaire de diminuer l'impact anthropique sur la structure des populations d'anguilles. L'effacement des seuils et barrages retardant ou bloquant l'espèce dans sa colonisation du bassin versant, pour tendre vers une transparence migratoire, est l'un des leviers d'action majeur susceptible d'influencer la répartition de l'espèce. Il est également capital de mettre l'accent sur la protection et la restauration des zones dans lesquelles on retrouve préférentiellement l'anguille, à savoir les zones humides, annexes hydrauliques, bras morts, dont la surface diminue d'année en année.

## 5 – Bibliographie

- Acou A., Legault A., Laffaille P., Feunteun E. 2009. Environmental determinism of year to year recruitment variability of European eel in a small coastal catchment, the Frémur R. *Journal of Fish Biology*, **74**, 1985-2001.
- Adam G., Feunteun E., Prouzet P., Rigaud C. coord. (2008). L'anguille européenne : Indicateurs d'abondance et de colonisation. Editions Quae, Savoir-faire, Versailles, 393p.
- Arribas, C., Fernandez-Delgado, C., Oliva-Paterna, F.J., Drake, P. 2012. Oceanic and local environmental conditions as forcing mechanisms of the glass eel recruitment to the southernmost European estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **107**, 46-57.
- Baisez, A., Laffaille, P. 2005. Un outil d'aide à la gestion de l'anguille : le tableau de bord anguille du bassin Loire. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, **378-379**, 115–130.
- Bardonnnet, A., Bolliet, V., Belon, V. 2005. Recruitment abundance estimation: Role of glass eel (*Anguilla anguilla* L.) response to light. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. **321**, 181-190.
- 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
- Besse, T., Laffaille, P. 2010. Front de colonisation de l'anguille européenne sur l'axe Loire. Logrami – Recueil de données biologiques sur les poissons migrateurs du bassin Loire.
- Bonhommeau, S., Chassot, E., Rivot, E. 2008. Fluctuations in European eel (*Anguilla anguilla*) recruitment resulting from environmental changes in the Sargasso Sea. *Fisheries Oceanography*, **17**, 32–44.
- Briand, C., Fatin, D., Fontenelle, G., Feunteun, E. 2005. Effect of re-opening of a migratory pathway for eel (*Anguilla anguilla*, L.) at a watershed scale. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, **378-379**, 67–86.
- Briand, C., Sauvaget, B. 2011. Analyse des tendances de stock d'anguilles jaunes du bassin versant de la Vilaine par pêche électrique. Institut d'Aménagement de la Vilaine.
- Bru, N., Prouzet, P., Leujeune, M. 2009. Daily and seasonal estimates of the recruitment and biomass of glass eels runs (*Anguilla anguilla*) and exploitation rates in the Adour open estuary (Southwestern France). *Aquatic Living Resources*, **22**, 509-523.
- Bruslé, J. 1990. Effects of heavy metals on eels, *Anguilla* sp. *Aquatic Living Resources*, **3**, 131-141.
- Buisson, L., Grenouillet, G., Villéger, S., Canal, J., Laffaille, P. 2013. Toward a loss of functional diversity in stream fish assemblages under climate change. *Global Change Biology*, **19**, 387–400.
- Bureau du Colombier, S., Bolliet, V., Lambert, P., Bardonnnet, A. 2007. Energy and migratory behavior in glass eels (*Anguilla anguilla*). *Physiology and Behaviour*, **92**, 684-690.

- Chancerel, F. 1994. Note technique. La répartition de l'anguille en France. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, **335**, 289-294.
- Charrier F., Mazel V., Caraguel J.-M., Abdallah Y., Le Gurun L., Legault A., Laffaille P. 2012. Escapement of a silver-phase eel population, *Anguilla anguilla*, determined from fishery in a Mediterranean lagoon (Or, France). *ICES Journal of Marine Science*, **69**, 30-33.
- Dekker, W. 2000. A Procrustean assessment of the European eel stock. *ICES Journal of Marine Science*, **57**, 938-947.
- Dekker, W. 2003a. On the distribution of the European eel (*Anguilla anguilla*) and its fisheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **60**, 787–799.
- Dekker, W. 2003b. Did lack of spawners cause the collapse of the European eel, *Anguilla anguilla*? *Fisheries Management and Ecology*, **10**, 365–376.
- Domingos, I., Costa, J.L. & Costa, M.J. 2006. Factors determining length distribution and abundance of the European eel, *Anguilla anguilla*, in the River Mondego (Portugal). *Freshwater Biology*, **51**, 2265–2281.
- Dumont, A. 2012. Suivi de la migration anadrome de l'anguille et état de ses populations sur le bassin du Gouessant (Côtes d'Armor). Fédération des Côtes d'Armor pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique.
- Eikaas, H.S., MacIntosh, A.R. 2006. Habitat loss through disruption of constrained dispersal networks. *Ecological Applications*, **16**, 987–998.
- Elie, P., Rochard, E. 1994. Migration des civelles d'anguilles (*Anguilla anguilla* L.) dans les estuaires, modalités du phénomène et caractéristiques des individus. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. **335**, 81-98.
- Feunteun, E., Acou, A., Guillouët, J., Laffaille, P., Legault, A. 1998. Spatial distribution of an eel population (*Anguilla anguilla* L.) in a small coastal catchment of northern Brittany (France). Consequences of hydraulic works. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, **349**, 129–139.
- 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. In: *Eel Biology*. Aida K., Tsukamoto K., Yamauchi K. (eds.). Springer-Verlag Tokyo: pp 191-213.
- Feunteun, E. 2002. Management and restoration of European eel population (*Anguilla anguilla*): an impossible bargain. *Ecological Engineering*, **18**, 575–591.
- Friedland, K.D., Miller, M.J., Knights, B. 2007. Oceanic changes in the Sargasso Sea and declines in recruitment of the European eel. *ICES Journal of Marine Science*, **64**, 519-530.
- Germis, G. 2009. Evaluation de l'état de la population d'anguille en Bretagne par la méthode des indices d'abondance « Anguille » de 2003 à 2008. Bretagne Grands Migrateurs.

- Germis, G. 2012. Suivi des migrations d'anguilles et évaluation des stocks en place sur le Frémur en 2011. Bretagne Grands Migrateurs.
- Gollock, M., Curnick, D., Debney, A. 2011. Recent recruitment trends of juvenile eels in tributaries of the River Thames. *Hydrobiologia*, **672**, 33-37.
- Guillouët, J., Acou, A., Mounaix, B., Legault, A., Feunteun, E., 2000. Etude de la restauration de la population d'anguille sur le Frémur : synthèse du suivi de 1995 à 1999. Rapport Fish-Pass, 104 p.
- Holmgren, K. 1996. Effect of water temperature and growth variation on the sex ratio of experimentally reared eels. *Ecology of Freshwater Fish*, **5**, 203–212.
- Ibbotson, I., Smith, J., Scarlett, P. & Aprahamian, M.W. 2002. Colonisation of freshwater habitats by the European eel *Anguilla anguilla*. *Freshwater Biology*, **47**, 1696–1706.
- ICES, 2012. Report of the Joint EIFAAC/ICES Working Group on Eels (WGEEL), 3–9 September 2012, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2012/ACOM:18. 824224 pp.
- ICES. 2013. Report of the Workshop on Evaluation Progress Eel Management Plans (WKEPEMP), 13–15 May 2013, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2013/ACOM:32. 757 pp.
- Jouanin, C., Briand, C., Beaulaton, L., Lambert, P. 2012. Eel Density Analysis (EDA 2.x). Un modèle statistique pour estimer l'échappement des anguilles argentées (*Anguilla anguilla*) dans un réseau hydrographique. Convention ONEMA-Cemagref. Partenariat 2011. Domaine : Espèces aquatiques continentales, Action 11.1. Rapport d'étape.
- La Bar, G.W., Hernando, A., Fernandez-Delgado, C. 1987. Local movements and population size of European eels, *Anguilla anguilla*, in a small lake of south-western Spain. *Environmental Biology of Fishes*, **19**, 111-117.
- Laffaille, P., Rigaud, C. 2008. Indicateurs de colonisation et de sédentarisation. In : Indicateurs d'abondance et de colonisation. Adam G., Feunteun E., Prouzet P., Rigaud C. (eds.). QUAE, Paris : 275-330.
- Laffaille, P., Feunteun, E., Baisez, A., Robinet, T., Acou, A., Legault, A. & Lek, S. 2003. Spatial organisation of European eel (*Anguilla anguilla* L.) in a small catchment. *Ecology of Freshwater Fish* **12**, 1–11.
- Laffaille P., Acou A., Guillouët J., 2005a. The yellow European eel (*Anguilla anguilla* L.) may adopt a sedentary lifestyle in inland freshwaters. *Ecology of Freshwater Fish*, **14**: 191-196.
- Laffaille, P., Briand, C., Fatin, D., Lafage, D. & Lasne, E. 2005b. Point sampling the abundance of European eel (*Anguilla anguilla*) in freshwater areas. *Archiv für Hydrobiologie*, **162**, 91–98.
- Laffaille, P., Acou, A., Guillouët, J., Mounaix, B., Legault, A. 2006. Patterns of silver eels (*Anguilla anguilla* L.) sex ratio in a catchment. *Ecology of Freshwater Fish*, **15**, 583–588.
- Laffaille, P., Caraguel, J.-M., Legault, A. 2007. Temporal patterns in the upstream migration of European glass eels (*Anguilla anguilla*) at the Couesnon estuarine dam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **73**, 81-90.

- Laffaille, P., Lasne, E., Baisez, A. 2009. Effects of the improvement of longitudinal connectivity on the colonization and distribution of European eel. *Ecology of Freshwater Fish*, **18**, 610-619.
- Lasne, E., Laffaille, P. 2008. Analysis of distribution patterns of yellow European eels in the Loire catchment using logistic models based on presence-absence of different size-classes. *Ecology of Freshwater Fish*, **17**, 30-37.
- Lasne, E., Laffaille, P. 2009. Information-theoretic approach for the assessment of freshwater yellow eel distribution in freshwaters. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, **4**, 390-391.
- Lasne, E., Lek, S., Laffaille, P. 2007. Patterns in fish assemblages in the Loire floodplain: the role of hydrological connectivity and implications for conservation. *Biological Conservation*, **139**, 258-268.
- Lasne, E., Acou, A., Vila-Gispert, A., Laffaille, P. 2008. European eel distribution and body condition in a river floodplain: effect of longitudinal and lateral connectivity. *Ecology of Freshwater Biology*, **17**, 567-576.
- Lobon-Cervia, J., Utrilla, C.G. & Rincon, P.A. 1995. Variations in the population dynamics of the European eel *Anguilla anguilla* (L.) along the course of a Cantabrian river. *Ecology of Freshwater Fish*, **4**, 17-27
- Melià, P., Bevacqua, D., J. Crivelli, A., Panfili, J., DeLeo, G.A., Gatto, M. 2006. Sex differentiation of the European eel in brackish and freshwater environments: a comparative analysis. *Journal of Fish Biology*, **69**, 1228-1235.
- McGovern, P., McCarthy, T.K. 1992. Local movements of freshwater eels (*Anguilla anguilla* L.) in western Ireland. In: *Wildlife Telemetry: Remote Sensing and Monitoring of Animals* (Eds I.G. Preide & S.M. Swift), pp. 319-327. Ellis Horwood, Chichester.
- Moriarty, C., and Dekker, W. (Editors). 1997. Management of the European eel. *Fishery Bulletin* (Dublin), **15**, 1-110.
- Naismith, I.A., Knights, B. 1988. Migrations of elvers and juvenile European eels, *Anguilla anguilla* L., in the River Thames. *Journal of Fish Biology*, **33**, 161-175.
- Naismith, I.A., Knights, B. 1993. The distribution, density and growth of the European eel, *Anguilla anguilla*, in the freshwater catchment of the River Thames. *Journal of Fish Biology*, **42**, 217-226.
- Nelva, A., Persat, H., Chessel, D. 1979. Une nouvelle méthode d'étude des peuplements ichtyologiques dans les grands cours d'eau par échantillonnage ponctuel d'abondance. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, **289**, série D : 1295-1298.
- Pella, H., Lejot, J., Lamouroux, N., Snelder, T. 2012. The theoretical hydrographical network (RHT) for France and its environmental attributes. *Géomorphologie*, **3**, 317-336.
- Rigaud, C., Laffaille, P., Prouzet, P., Feunteun, E., Diaz, E., Castellano, J., De Casamajor, M.N. 2008. Des compléments sur la biologie de l'anguille européenne. In : Adam, G., Feunteun, E., Prouzet, P., Rigaud, C. eds. *L'anguille européenne. Indicateurs d'abondance et de colonisation*. Versailles : QUAE, pp. 43-86.

- Selleslagh, J., Lobry, J., Amara, R., Brylinski, J-M., Boët, P. 2011. Trophic functioning of coastal ecosystems along an anthropogenic pressure gradient: A French case study with emphasis on a small and low impacted estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **112**, 73-85.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., Araújo, M.B. 2009. BIOMOD – A platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, **32**, 369-373.
- White, E.M., Knights, B. 1997. Dynamics of upstream migration of the European eel, *Anguilla anguilla* (L.), in the Rivers Severn and Avon, England, with special reference to the effects of man-made barriers. *Fisheries Management and Ecology*, **4**, 311–324.



## FICHE TERRAIN ANGUILLES

Bassin  Cours d'eau  Station :   
 Commune  Date  Organisme   
 Coordonnées ( Lambert 93 ) : X =  Y =

### Captures d'anguilles (nombre par classe réalisées par 5'0)

Classe de taille	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
< 120 mm																															
120 - 150 mm																															
150 - 200 mm																															
200 - 250 mm																															
> 250 mm																															

### Description des habitats

Exotés (%) (nombre de points) Cascade  Rapide  Ravier  Plat courant  Plat lent  Profond  
 Substrat (%) Vase  Sable  Graviers  Galets  Blocs  Autres :   
 Présence habitats piscicoles  Mares  Végétation du lit  Sous-berges  Bois mort  Blocs  Autres :   
 Végétation aquatique (%) Héophytes  Hydrophytes  Hydro flottants  Algues filamenteuses  Autres :   
 Ombrage (%)

### Caractéristiques de la station

Occupation du lit majeur (%) Urbain  Agricole  Forêt   
 Largeur moyenne  Profondeur moyenne

### Autres espèces

ESPECE	Nombre	ESPECE	Nombre	ESPECE	Nombre