



HAL
open science

Comportement des géniteurs de saumons et utilisation de l'habitat lors de leur retour en rivière

Emilien Lasne, Julien Tremblay, Guillaume Forget, Mathieu Anfray, Armand Michelot, Kévin Deroyer, Théo Chaubet, François Martignac

► **To cite this version:**

Emilien Lasne, Julien Tremblay, Guillaume Forget, Mathieu Anfray, Armand Michelot, et al.. Comportement des géniteurs de saumons et utilisation de l'habitat lors de leur retour en rivière. INRAE. 2023, 48 p. hal-04663988

HAL Id: hal-04663988

<https://hal.science/hal-04663988v1>

Submitted on 29 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Comportement des géniteurs de saumons et utilisation de l'habitat lors de leur retour en rivière

Cas de la Sélune avant l'arasement des grands barrages

Rapport final

Emilien LASNE^{1,2}
Julien TREMBLAY^{2,3}
Guillaume FORGET^{1,2}
Mathieu ANFRAY⁴
Armand MICHELOT^{1,2}
Kévin DERoyer^{1,2}
Théo CHAUBET^{1,2}
François MARTIGNAC^{1,2}

1 UMR DECOD

2 Pôle Gestion des Migrateurs Amphihalins dans leur Environnement,
OFB, INRAE, AGROCAMBUS OUEST, UNIV PAU & PAYS ADOUR/E2S UPPA

3 U3E, INRAE, OFB, Rennes France

4 OFB, Coutances, France

janvier – 2023

- AUTEURS

Emilien LASNE, Chercheur INRAE, pôle MIAME, emilien.lasne@inrae.fr

Julien Tremblay, Technicien INRAE, pôle MIAME, julien.tremblay@inrae.fr

Guillaume FORGET, Assistant Ingénieur INRAE, pôle MIAME, guillaume.forget@inrae.fr

Mathieu ANFRAY, Technicien OFB, Unité Spécialisée Migrateurs, mathieu.anfray@ofb.gouv.fr

Armand MICHELOT, Technicien INRAE, pôle MIAME, armand.michelot@inrae.fr

Kévin DERoyer, Technicien INRAE, pôle MIAME, (contractuel, 01/02/2021-31/01/2022)

Théo CHAUBET, Technicien INRAE, pôle MIAME (contractuel, 01/02/2019-31/01/2021)

François MARTIGNAC, Ingénieur de recherche INRAE, pôle MIAME, francois.martignac@inrae.fr

- CONTRIBUTEURS

Richard DELANOE, Technicien OFB

Jean-Pierre DESTOUCHES, Technicien INRAE, pôle MIAME

Droits d'usage : [par ex. accès libre ou accès réservé à XXX]

Niveau géographique : [un seul choix entre : mondial, national, régional, départemental, communal]

Couverture géographique : [indiquer le ou les pays, région, département ou commune, citations locales]

Niveau de lecture : [plusieurs choix possibles parmi : scolaires, citoyens, professionnels, experts]

- **TITRE, AUTEURS**

Comportement des géniteurs de saumons et utilisation de l'habitat lors de leur retour en rivière. Cas de la Sélune avant l'arasement des grands barrages. Emilien LASNE, Julien Tremblay, Guillaume FORGET, Mathieu ANFRAY, Armand MICHELOT, Kévin DERoyer, Théo CHAUBET, François MARTIGNAC

- **RESUME**

L'arasement des barrages de Vezins (36m) en 2019 et la Roche-qui-Boit (16m) en 2022 va permettre aux poissons migrateurs de recoloniser la partie amont du Bassin versant de la Sélune. Le suivi radio-téléométrique de 98 géniteurs de saumon atlantique (*Salmo salar*), essentiellement des individus de 1 hiver de mer, capturés et équipés d'émetteurs-biologgers dans l'estuaire de la Sélune en été sur la période 2019-2021, a permis de produire des données sur l'écologie de la population avant arasement. A partir de 2022, une deuxième phase aura vocation à analyser le processus de recolonisation. La première étape de ce projet a été la mise au point d'une méthode de capture des saumons en estuaire. Le protocole développé met en œuvre un filet barrage guidant les saumons vers un carrelet. L'utilisation d'une caméra acoustique permet d'actionner le carrelet lors d'un passage de saumon. Les saumons capturés sont équipés d'émetteurs-loggers insérés dans l'estomac par la bouche, puis suivis par un réseau d'une 10^{aine} d'antennes fixes ainsi que par un pistage actif hebdomadaire. Les biologgers mesurent et enregistrent la température corporelle, la profondeur et l'activité par le biais d'accéléromètres. L'histoire des individus est inférée en combinant les données de géolocalisation et les données issues de biologgers lorsque ceux-ci ont pu être récupérés.

La proportion des géniteurs de saumons suivi atteignant la période de reproduction en décembre est assez faible (28% en 2019 et 38% en 2020 et 2021). La mortalité par pêche estivale est estimée sur la base des déclarations volontaires de pêcheurs à la ligne. Elle s'élève à 10, 12 et 0% en 2019, 2020 et 2021, respectivement. La mortalité apparente, hors pêche, est forte (44 à 57%), et globalement concentrée en milieu d'été et en milieu d'automne. Les causes impliquées sont difficilement identifiables.

Après une entrée en eau douce très rapide dans la foulée du marquage, les saumons montrent un arrêt estival net sur la partie aval du cours d'eau en aval de Ducey qui se prolonge jusqu'à l'automne. A cette période, les individus se remettent en mouvement à la recherche des zones de reproduction en amont. Une fraction des individus quitte alors le bassin versant pour la Sée ou le Couesnon. Une autre fraction se présente au barrage de la Roche-qui-Boit. Parmi ceux-là, certains sont morts au pied du barrage ou plus en aval, d'autres sont redescendus pour se reproduire sur la Sélune, sur l'Oir ou le Beuvron. La migration d'individus jusqu'au pied du barrage suggère que la recolonisation des secteurs amont sera rapide après arasement du barrage de la Roche qui boit.

- **MOTS CLES (THEMATIQUES ET GEOGRAPHIQUES)**

Continuité écologique, thermie, Sélune, barrages, migration, mortalité

● SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	5
I.1. CONTEXTE.....	5
I.1.1. LA RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE DE LA SELUNE ET LES ENJEUX LIÉS AU SAUMON.....	5
I.2. LE SAUMON ATLANTIQUE : PROBLÉMATIQUE GLOBALE ET LOCALE.....	6
I.2.1. ÉTAT DE L'ART SUR LA PHASE D'EAU DOUCE DES GENITEURS DE SAUMON ATLANTIQUE	6
I.2.2. ENJEUX CONCERNANT LES GENITEURS DE SAUMON DANS LA SELUNE	9
I.3. OBJECTIF ET DEMARCHE	9
II. MATÉRIEL ET MÉTHODE	10
II.1. LA SELUNE ET SON BASSIN VERSANT	10
II.2. LA POPULATION DE SAUMON DE LA SELUNE.....	10
II.3. CAPTURE DES SAUMONS, PRÉLEVEMENTS ET BIOMÉTRIE	11
II.3.1. SITE ET MÉTHODE DE CAPTURE.....	11
II.3.2. PRÉLEVEMENTS ET BIOMÉTRIE.....	13
II.4. PROTOCOLE DE RADIO TÉLÉMETRIE ET DE BIOLOGGING.....	14
II.4.1. MATÉRIEL UTILISÉ	14
II.4.1.1. ÉMETTEURS.....	14
II.4.1.2. RECEPTEURS.....	16
II.4.2. MARQUAGE DES SAUMONS	17
II.4.3. SUIVI DES SAUMONS	18
II.4.4. RECUPERATION DES ÉMETTEURS.....	19
II.5. DONNÉES ENVIRONNEMENTALES.....	20
III. RESULTATS	20
III.1. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES	20
III.2. DONNÉES BIOLOGIQUES	23
III.2.1. EFFORT DE CAPTURE ET ÉCHANTILLON DE SAUMONS MARQUÉS	23
III.2.2. DONNÉES GÉNÉRALES.....	27
III.2.3. DONNÉES SPATIALES	28
III.2.4. DONNÉES ISSUES DU BIOLOGGING	35
IV. DISCUSSION	39
IV.1. CONTRIBUTION MÉTHODOLOGIQUE	39
IV.2. CONTRIBUTION À LA PROBLÉMATIQUE DE LA CONTINUITÉ DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SELUNE.....	40
IV.3. CONTRIBUTION À LA PROBLÉMATIQUE SAUMON/THERMIE	40
IV.4. APPUI AUX POLITIQUES PUBLIQUES	41
IV.5. PERSPECTIVES	41
V. RÉFÉRENCES.....	43

Préambule

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre d'une action du Pôle MIAME initiée en 2019. Cette action visait à analyser les déplacements des poissons migrateurs dans le bassin de la Sélune dans le contexte d'arasement des deux obstacles majeurs que sont les barrages de Vezins et de la Roche-Qui-Boit. Une première phase (2019), focalisée sur les géniteurs de saumon atlantique et l'anguille européenne au stade jaune, avait pour objectif la mise en place de la méthodologie de suivi télémétrique pour le suivi de saumons depuis leur entrée en estuaire jusqu'à la reproduction, et l'évaluation de la mobilité des anguilles jaunes en aval du barrage et leur statut de potentiel colonisateurs des secteurs amont. En ce qui concerne le saumon, les développements méthodologiques ont été concluants et une deuxième étape (2020-2021) a été planifiée pour un suivi pré arasement. En ce qui concerne l'anguille, il s'est avéré que les individus de l'échantillon étudié étaient très peu mobiles, ce qui a remis en question la pertinence de la poursuite de l'étude qui a donc été mise de côté (voir Lasne et al., 2020 pour les détails). Le projet s'est donc concentré par la suite sur le saumon et ce rapport se concentre également sur le saumon.

I. Introduction

I.1. Contexte

I.1.1. La restauration de la continuité écologique de la Sélune et les enjeux liés au saumon

Les lois « Grenelle I et II » (2009 et 2010) ont introduit la démarche Trame Verte et Bleue (TVB) dans le droit français (codes de l'environnement et de l'urbanisme) pour favoriser la continuité écologique et la préservation de la biodiversité. C'est notamment dans ce cadre de la restauration des continuités écologiques des cours d'eau que le processus d'arasement des barrages de la Sélune a été engagé. En effet, deux barrages infranchissables érigés entre 1920 et 1930 à des fins de production hydroélectrique jalonnaient le cours de la Sélune à 22 et 28 kilomètres de la Manche (Douillard & Judic, 2014). Le barrage de Vezins, le plus amont et d'une hauteur de 36m a été démantelé entre 2019 et 2020. Le barrage de la Roche-Qui-Boit devait être détruit à l'automne 2021, mais les travaux ont été repoussés au printemps 2022. La vidange du barrage a eu lieu en mai 2022 et son démantèlement s'est poursuivi tout l'été. Finalement, la transparence migratoire a été complète en novembre 2022 suite au remaniement du lit de la rivière et l'aplanissement des derniers seuils.

Un des grands enjeux de la restauration de la continuité écologique dans le bassin de la Sélune est la recolonisation, par les poissons migrateurs, des secteurs situés en amont des barrages qui offrent un important potentiel d'habitat et de production (Forget *et al.*, 2018). L'hypothèse d'une recolonisation relativement rapide et massive de ces zones, comme cela a été observé dans d'autres contextes (Pess *et al.*, 2014), favorisant la dynamique des populations, a été un argument fort pour motiver l'arasement étant donnée la problématique de conservation des populations. La communauté des poissons amphihalins de la Sélune est en effet composée d'un nombre important d'espèces : anguille européenne (*Anguilla anguilla*), saumon atlantique (*Salmo salar*), truite de mer (*Salmo trutta trutta*), lamproies marines (*Petromyzon marinus*) et fluviatiles (*Lampetra fluviatilis*), mulot porc (*Chelon ramada*), flet (*Platichthys flesus*), et grande alose (*Alosa alosa*). Certaines de ces espèces (anguille, saumon, truite de mer et lamproies) ont l'opportunité de voir leur surface d'habitat de reproduction et/ou de croissance juvénile augmenter significativement (Forget *et al.*, 2018). Dans ce contexte, et compte-tenu des enjeux saillants concernant le saumon atlantique – espèce emblématique

localement et sur le déclin à une échelle nationale- un intérêt particulier lui est porté (André *et al.*, 2021).

L'objectif de cette action du Pôle MIAME qui s'inscrit dans le cadre du programme scientifique de la Sélune¹ est de caractériser les déplacements et les facteurs de pressions subis par les saumons lors de leur retour en rivière et jusqu'à la reproduction en condition pré-arasement. Une autre étude aura pour vocation, post-arasement, d'évaluer la dynamique spatio-temporelle de recolonisation des secteurs amont.

D'un point de vue opérationnel, cette évaluation constituera une étape importante très fortement attendue par les pouvoirs publics, les gestionnaires et les riverains, mais également par la communauté scientifique. Il s'agira notamment de déterminer à quelle vitesse s'effectue la recolonisation des saumons, jusqu'où ils remontent, quels sont les affluents et les habitats utilisés et quelles sont les implications sur l'utilisation des secteurs aval. A plus grande échelle, il s'agira d'évaluer l'impact de l'arasement des barrages sur l'attractivité du bassin de la Sélune pour les salmonidés et les flux d'individus entre les fleuves voisins que sont la Sée, le Couesnon et la Sienne. *In fine*, il s'agira de dire si, oui ou non, l'arasement des barrages a été bénéfique à la population de saumons, et de quelle façon.

D'un point de vue scientifique, l'analyse des déplacements et de l'utilisation des habitats dans la Sélune constitue une occasion unique de comprendre le processus de (re-)colonisation et de valider les modèles prédictifs d'habitat (Forget *et al.*, 2018) en confrontant les données issues de la modélisation (habitats potentiels) et les données issues d'observation de terrain. En Europe, une telle expérience de restauration de la connectivité dans un écosystème fluvial côtier de cette dimension est unique et les données et connaissances produites seront donc originales.

1.2. Le saumon atlantique : problématique globale et locale

1.2.1. Etat de l'art sur la phase d'eau douce des géniteurs de saumon atlantique

Après la phase de croissance marine, les adultes de saumon atlantique retournent en eau douce entre le printemps et l'été, soit plusieurs mois avant la reproduction qui a lieu en décembre. Pendant cette période ils cessent de s'alimenter et attendent, à l'aval des cours d'eau, l'augmentation des débits à l'automne qui sera le signal pour effectuer la migration ultime vers les frayères. C'est également au cours de l'été que s'initie la gamétogénèse captant une part significative du budget énergétique et de l'activité métabolique. Il s'agit donc d'une période décisive où les saumons doivent conserver assez de réserves énergétiques pour produire les gamètes et développer les caractères sexuels secondaires (en particulier pour les mâles), pour rallier les zones de reproduction et s'y reproduire. La reproduction implique par ailleurs la recherche active des partenaires, les comportements territoriaux et nuptiaux ainsi que le creusement des nids (pour les femelles) qui sont également énergivores.

Cette phase du cycle de vie en estuaire et en eau douce est assez mal documentée relativement au reste du cycle dulçaquicole, et cela est dû en grande partie à des raisons méthodologiques. La capture des poissons à l'aval des bassins versant est complexe. Les infrastructures permettant la capture des poissons sont généralement situées en amont voire très en amont de l'estuaire, bien que des exemples de systèmes de piégeage situés en aval à proximité de la limite d'influence tidale existent (Passes-piège de [Chateaulin sur l'Aulne](#) ou de [Pont-Scorff sur le Scorff](#)).

La migration génésique des saumons dans les cours d'eau est classiquement décomposée en trois phases (Figure 1, Milner *et al.*, 2012). Le rôle des augmentations de débit dans la dynamique

¹ <https://programme-selune.com/>

migratoire est globalement reconnu, mais il n'existe pas de valeur seuil (excepté au niveau d'obstacles dont le franchissement n'est possible qu'à certains débits). Ce sont davantage des changements relatifs de débits qui semblent induire les mouvements des poissons. Par ailleurs, les effets sont rivière-spécifiques mais également, au sein des cours d'eau, site-spécifique. La température et, lors de l'entrée en eau douce, l'amplitude tidale jouent aussi un rôle. Cependant, les fortes interrelations entre ces facteurs rendent difficile l'identification d'une règle générale.

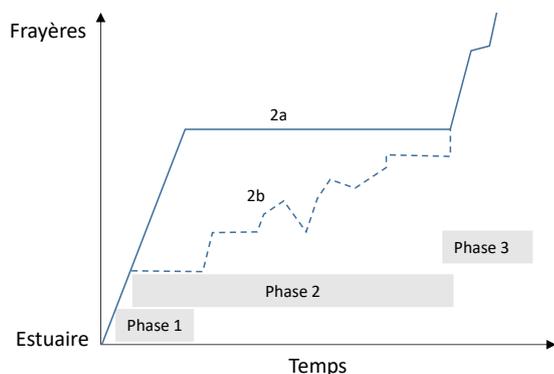


Figure 1 : Dynamique de migration génésique des saumons en cours d'eau. On distingue classiquement trois phases. Phase 1, mouvement rapide en amont de la limite tidale à travers la partie basse du cours d'eau; phase 2 : arrêt estival marqué dans le cours principal ou des affluents d'ordre supérieur (2a) avec possiblement des mouvements ou une montaison progressive alternant avec des périodes de repos (2b); phase 3 : à l'automne, déplacement rapides vers les zones de reproduction sur le cours principal ou les affluents lorsque les débits augmentent. D'après Milner et al. (2012).

Lors de la migration génésique en eau douce, les pressions qui s'exercent sur les individus sont multiples. Historiquement, la rupture de continuité est le principal facteur de perturbation. Les obstacles à la migration de montaison tels que les seuils de moulins, les barrages hydroélectriques etc. ralentissent ou empêchent la migration. Dans le cas d'un ralentissement, le succès reproducteur est affecté par des dépenses énergétiques supplémentaires ou des retards sur le site de reproduction, ou bien une exposition accrue à d'autres facteurs de pression, par exemple physico-chimiques ou biologiques (Boulêtreau *et al.*, 2018). La franchissabilité des obstacles peut, selon les cas, être modulés par les conditions hydrologiques, soit favorisés ou empêchés par des débits faibles ou forts. La modification des régimes hydrologiques associée au changement climatique est susceptible de poser problème en réduisant la connectivité longitudinale (Fenkes *et al.*, 2016).

Dans le bassin versant de la Sélune, les barrages de la Roche-qui-Boit et de Vezins ont empêché l'accès à 70% du réseau hydrographique depuis 1916, réduisant ainsi drastiquement la capacité de production du bassin (Douillard & Judic, 2014). Rien que sur les secteurs anciennement ennoyés à l'amont des barrages et qui ne représentent que 8.3% de la surface d'habitat, et compte tenu de leur qualité potentielle, les estimations de production des géniteurs pour ces secteurs étaient d'environ 33% de la totalité du bassin versant (Forget *et al.*, 2018).

Dans le contexte actuel de changement climatique, la modification du contexte thermique est un facteur de pression supplémentaire. Le saumon atlantique est, comme la plupart des salmonidés, une espèce d'eau froide. Si la sensibilité aux températures élevées est connue pour être particulièrement marquée pour les jeunes stades – embryons et juvéniles, les adultes reproducteurs sont également affectés par des régimes thermiques chauds (Dahlke *et al.*, 2020). Des travaux ont montré que des températures estivales élevées sont susceptibles d'affecter la physiologie et le métabolisme des poissons (Fenkes *et al.*, 2016), perturbe la dynamique migratoire (Baisez *et al.*, 2011), diminue la quantité de ressources disponibles pour la reproduction (Lennox *et al.*, 2018), la qualité des gamètes (King *et al.*, 2007), la survie (Baisez *et al.*, 2011) et au final, le succès reproducteur. Le changement climatique, en modifiant les régimes thermiques des cours d'eau, constitue une réelle menace pour les populations, en particulier dans le sud de l'aire de distribution de l'espèce.

La tolérance thermique des saumons adultes est assez mal connue et varie selon les populations, mais il est globalement admis que des températures entre 20 et 23°C sont stressantes (Wilkie *et al.*, 1997; Frechette *et al.*, 2018), et la température critique, au-delà de laquelle la survie est menacée à court terme est estimée à 25°C (

Figure 2; Breau, 2013). Cependant, il est assez clairement établi que les populations de salmonidés ont développé des adaptations physiologiques locales pour répondre aux contraintes spécifiques à leur environnement (Eliason *et al.*, 2011). Cela a notamment été montré pour le saumon atlantique. Gradil *et al.* (2016) montrent notamment, par une approche expérimentale de type 'common garden', que les juvéniles issus de populations évoluant dans des environnements thermiquement contrastés, les températures optimales se situent systématiquement quelques degrés en deçà de la température moyenne des mois d'été (2.2–3.8 °C), et la limite supérieur critique ('upper critical temperature' définie par les auteurs comme la température à laquelle le cœur devient arythmique) est quasiment identique aux températures maximales des cours d'eau d'origine. Notons que, sur la base des travaux de Dahlke *et al.* (2020), on peut raisonnablement supposer que ces valeurs sont situées au-delà des valeurs seuil pour des adultes en été, alors que ceux-ci doivent consacrer une part de leur activité métabolique à préparer la reproduction (incluant notamment la migration et la gamétogénèse).

Dans les différentes études sur le sujet, les marqueurs de réponses des poissons à l'augmentation de température sont variées et complexes, pouvant prendre en compte la vitesse de réchauffement des eaux, la fluctuation de la température, la durée d'exposition, la période d'acclimatation, etc., et mettent en œuvre différents points d'évaluation (Wismer & Christie, 1987; Pahl, 2017). L'acclimatation (i.e. l'augmentation progressive et lente des températures), par exemple, permet une meilleure réponse à l'exposition à des températures élevées (Gerber *et al.* 2020).

Au final, évaluer des valeurs limites théoriques en milieu naturel est difficile. L'évaluation, par des mesures directes sur le terrain, de la réponse des poissons est une option intéressante puisqu'elle intègre toute la complexité des écosystèmes et des combinaisons de facteurs de stress, ainsi que les spécificités génétiques et biologiques des populations. En retour, l'analyse de la contribution relative des différents paramètres en jeu est plus délicate.

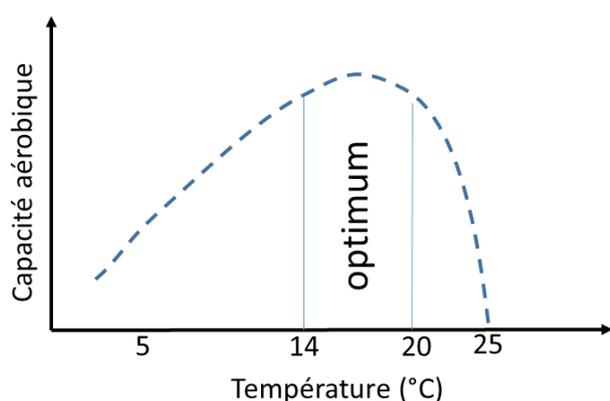


Figure 2 : Capacité aérobie en fonction de la température chez le saumon atlantique. La capacité aérobie, définie comme la capacité à produire de l'énergie pour des fonctions autres que les fonctions d'entretien basales de l'organisme, est optimale entre 14 et 20°C. Au-delà de 20°C, elle diminue assez rapidement pour être nulle vers 25°C. Les valeurs indiquées sont issues de la synthèse de Breau (2013) et peuvent varier selon les populations.

1.2.2. Enjeux concernant les géniteurs de saumon dans la Sélune

La population de saumons de la Sélune fait actuellement face à (au moins !) deux grands bouleversements : la modification de l'habitat en lien avec la restauration de la connectivité effective à la fin de l'automne

2022, et les changements thermiques en lien avec le changement climatique. La restauration de la connectivité va permettre à la population de la Sélune à court ou moyen terme d'augmenter sa capacité d'accueil puisque l'on suppose que la recolonisation des secteurs amont sera rapide, et cela devrait avoir des conséquences positives sur la dynamique de population (Forget *et al.*, 2018). Sur l'Elwha River, alors que seulement 7.9% du linéaire étaient accessibles aux poissons migrateurs, l'arasement d'un barrage a entraîné une large recolonisation du bassin versant dans les deux ans et demi suivants, et l'observation d'individus de différentes espèces de salmonidés migrateurs dès l'année suivant l'ouverture (Duda *et al.*, 2021).

Le changement du régime thermique va quant à lui agir négativement sur une échelle de temps plus longue, avec, malgré tout, l'occurrence potentielle d'évènements extrêmes dont les manifestations seront observables à court terme. Dans la Sélune, les conditions thermiques estivales sont très variables au sein et entre années. Les enregistrements réalisés sur le cours principal montrent que celles-ci dépassent régulièrement les 20°C et peuvent ponctuellement dépasser les 25°C. Un des enjeux est de savoir si les saumons ont la possibilité d'adapter leur comportement pour répondre aux contraintes thermiques par exemple en réduisant leur activité (Lennox *et al.*, 2019) et/ou en utilisant des refuges thermiques comme des fosses ou les apports d'affluents plus frais, si toutefois de tels habitats sont disponibles (Frechette *et al.*, 2018). On peut supposer que, grâce au démantèlement des barrages et à la plus grande diversité d'habitats disponibles, les saumons auront davantage de possibilités pour faire face aux contraintes thermiques.

1.3. Objectif et démarche

L'objectif général de cette étude est de produire des connaissances sur l'utilisation de l'habitat des géniteurs de saumons atlantiques avant l'arasement du dernier grand barrage, et en particulier sur :

- la dynamique migratoire et les habitats utilisés,
- la mortalité (périodes et les zones de mortalité),
- les facteurs environnementaux impliqués dans les patrons observés,
- les conditions thermiques auxquelles les poissons sont exposés.

Pour cela, la radio-télémetrie, méthode classiquement mise en œuvre dans le cadre d'étude s'intéressant aux déplacements des saumons en particulier des problématiques de connectivité (voir par exemple Gerlier & Roche, 1998; Croze, 2005; Duda *et al.*, 2021), a été utilisée, et couplée à une approche de biologging. Le biologging désigne l'utilisation de capteurs-enregistreurs installés sur ou dans les organismes pour obtenir des informations sur leur état physiologique ou leur comportement ainsi que sur leur environnement (Cooke *et al.*, 2013; Lennox *et al.*, 2017). Le biologging est une approche en plein développement (miniaturisation et diversification des capteurs), et il est de plus en plus fréquemment utilisé dans les études en lien avec les changements globaux pour analyser la réponse des organismes aux contraintes environnementales (Chmura *et al.*, 2018). La méthodologie de capture, de marquage et de suivi a été mise au point et validée en 2019 (Lasne *et al.*, 2020).

En 2019, 2020 et 2021, des poissons de retour de mer capturés lors de leur passage dans l'estuaire de la Sélune ont été équipés d'émetteurs-enregistreurs couplés à des capteurs de pression, des enregistreurs de température et des accéléromètres puis suivis jusqu'à la reproduction par un réseau d'antennes fixes déployées le long du réseau hydrographique ainsi que par le biais d'un pistage actif hebdomadaire.

Un suivi est également effectué pendant et après l'arasement (2022-2023) et permettra d'évaluer d'éventuelles modifications des patrons décrits en pré-arasement et la dynamique de recolonisation des secteurs amont.

II. Matériel et Méthode

II.1. La Sélune et son bassin versant

La Sélune s'écoule sur 72 km de long entre sa source, située à 140m d'altitude à Saint Cyr du Bailleul dans l'Est du département de la Manche, et la baie du Mont Saint Michel qu'elle rejoint par un estuaire d'environ 14km de long. Le bassin versant draine une surface de 1050km² à cheval sur les départements de la Manche, de la Mayenne et de l'Ille et Vilaine. Les deux principaux affluents de la Sélune sont l'Airon (275km²) situé à l'amont de l'ancien barrage de Vezins et du Beuvron situé à l'aval du barrage de la Roche-Qui-Boit (126km²), tous deux situés rive gauche

Le débit moyen du cours d'eau est proche de 10 m³/s et le débit d'étiage de référence légèrement inférieur à 2 m³/s. Les crues peuvent atteindre 100m³/s (crues de retour 20 ans).

Quatre principaux tronçons peuvent être décrits sur le cours de la Sélune :

- en aval des barrages, la Sélune est méandriforme et possède une largeur moyenne d'environ 20m et s'écoule dans une plaine alluviale,
- en amont du barrage de la Roche-Qui-Boit et jusqu'à Virey (ancienne étendue d'eau), la vallée est beaucoup plus encaissée et toujours méandriforme,
- vers Saint-Hilaire-du-Harcouët, la Sélune est plus étroite (10m) et rectiligne, traversant une zone de plateau au relief moins pentu,
- dans le secteur des sources, le fleuve est beaucoup plus étroit et les pentes plus fortes (Douillard & Judic, 2014).

La limite de salure des eaux est située à 1500m environ à l'amont du pont routier de la commune de Pontaubault ([SHOM](#) ; Figure 4). La limite de marée dynamique s'étend lors des grandes marées jusqu'au seuil de Ducey.

II.2. La population de saumon de la Sélune

La population de saumons de la Sélune, avec celle de la Sée, constitue un bastion de l'espèce à l'échelle française où la reproduction y est naturelle (i.e. pas entretenue par le repeuplement ; André *et al.*, 2021). Ces deux populations, avec celle de la Sienne et du Couesnon, proches voisines, constituent la métapopulation de Baie du Mont Saint Michel. Les flux d'individus entre ces fleuves sont assez importants pour contribuer à homogénéiser les patrimoines génétiques. Cette métapopulation appartient à un groupe de populations assez homogènes également du point de vue génétique, le groupe 'Basse-Normandie' (métapopulation) qui inclue les populations bas-normandes côté baie de Seine (Figure 3 ; Perrier *et al.*, 2011).

Les données historiques révèlent la présence très ancienne et l'abondance du saumon dans le bassin

de la Sélune, y compris à l'amont des barrages, comme en témoignent les vestiges de pêcheries (Thomas, 2015).

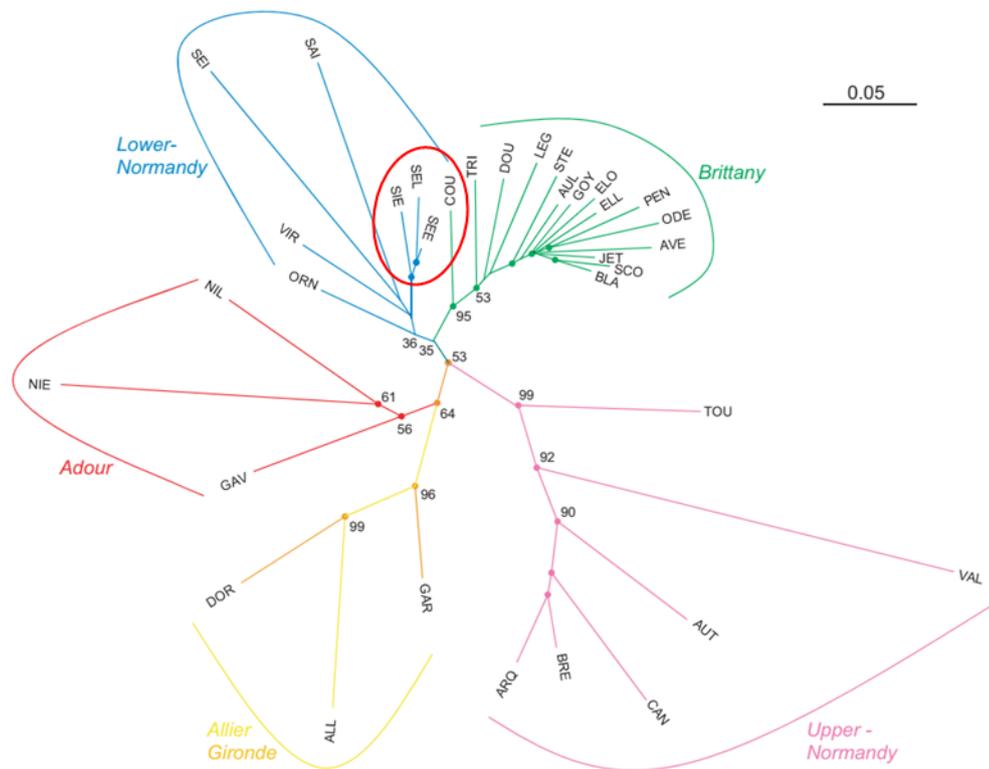


Figure 3 : Arbre phylogénétique de 34 populations françaises de saumon atlantique. Les populations de la Sée, de la Sélune, de la Sienne et du Couesnon appartiennent au groupe Basse Normandie et sont très proches génétiquement (d'après Perrier et al., 2011).

II.3. Capture des saumons, prélèvements et biométrie

II.3.1. Site et méthode de capture

Les saumons sont capturés en estuaire sur la commune du Val Saint Père au niveau de deux sites permettant d'accéder aux individus très tôt dans leur migration anadrome (Figure 4). Le cours de la Sélune y est assez étroit à marée basse en excédant rarement 1m20 de hauteur et il est ainsi possible barrer toute ou partie de la rivière à l'aide d'un filet barrage pour contraindre les poissons à se diriger vers le système de capture. La veine de courant principal, a priori utilisée préférentiellement par les saumons est située rive droite. Ces sites permettent en outre un accès pratique en véhicule. Ils sont utilisables pour des marées d'une hauteur maximale d'environ 11,50m (cote de Cancale), au-delà, l'installation est noyée et inopérante. Les débits de la Sélune limitent les possibilités de captures au printemps de sorte que les premières des opérations de captures sont effectuées en fin de printemps.

Selon les années et le tracé de la Sélune soumis aux conditions hydrologiques de la Sélune et de l'intensité des marées, l'un des deux sites est utilisé.

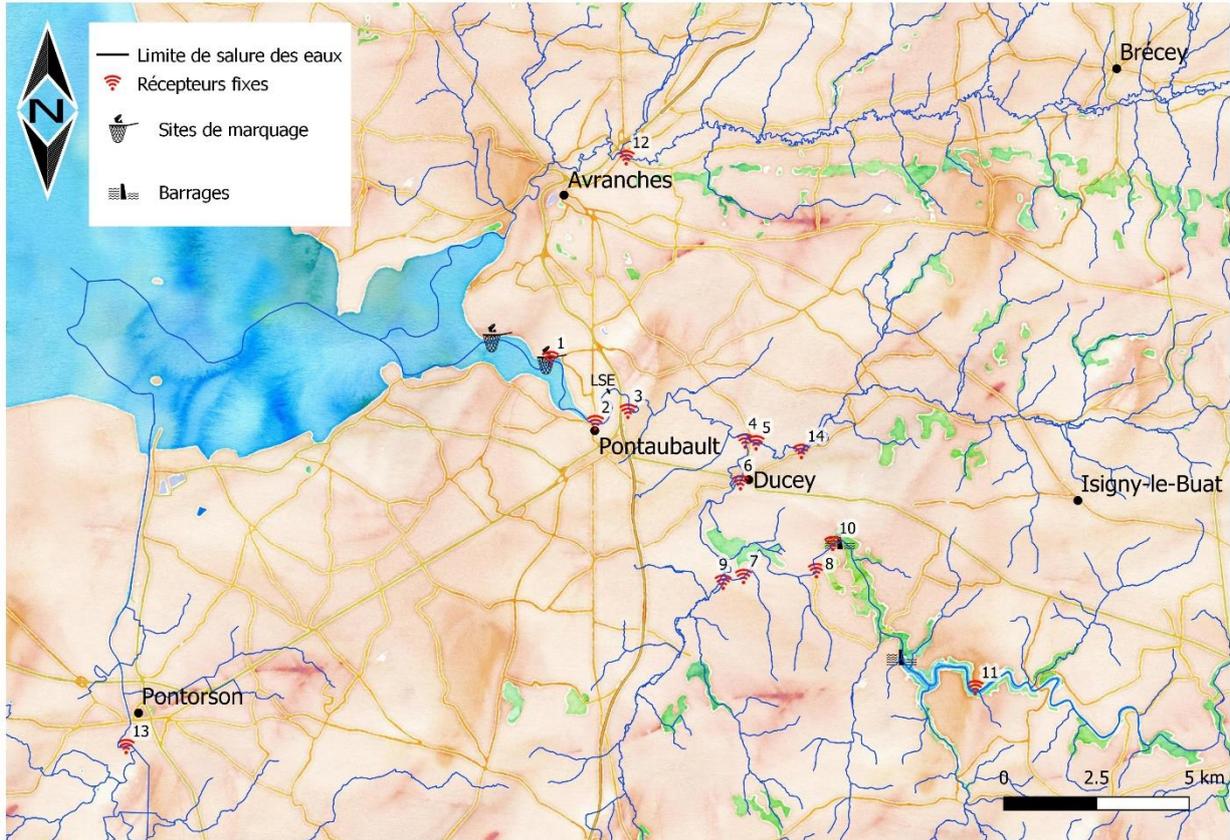


Figure 4 : Localisation des sites de marquage et des récepteurs fixes sur le Couesnon (13), la Sée (12) et la Sélune (autres numéros). Les numéros associés aux récepteurs fixes renvoient aux éléments du Tableau 1.

Le filet est disposé de façon oblique du côté rive droite (amont) vers la rive gauche (aval) de façon à guider les saumons vers la rive droite.

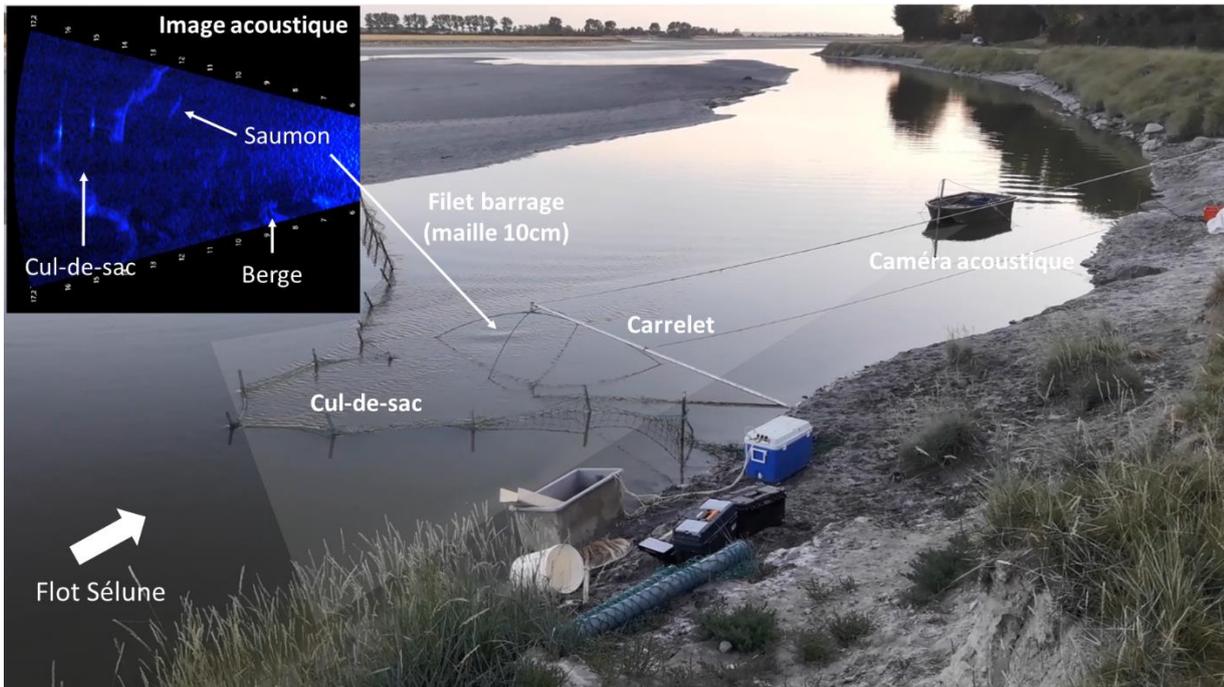


Figure 5 : Dispositif de capture des saumons. NB : Le matériel est monté et démonté et remonté à chaque session de capture. Les captures se font dans le cadre d'un arrêté préfectoral de captures à des fins scientifiques.

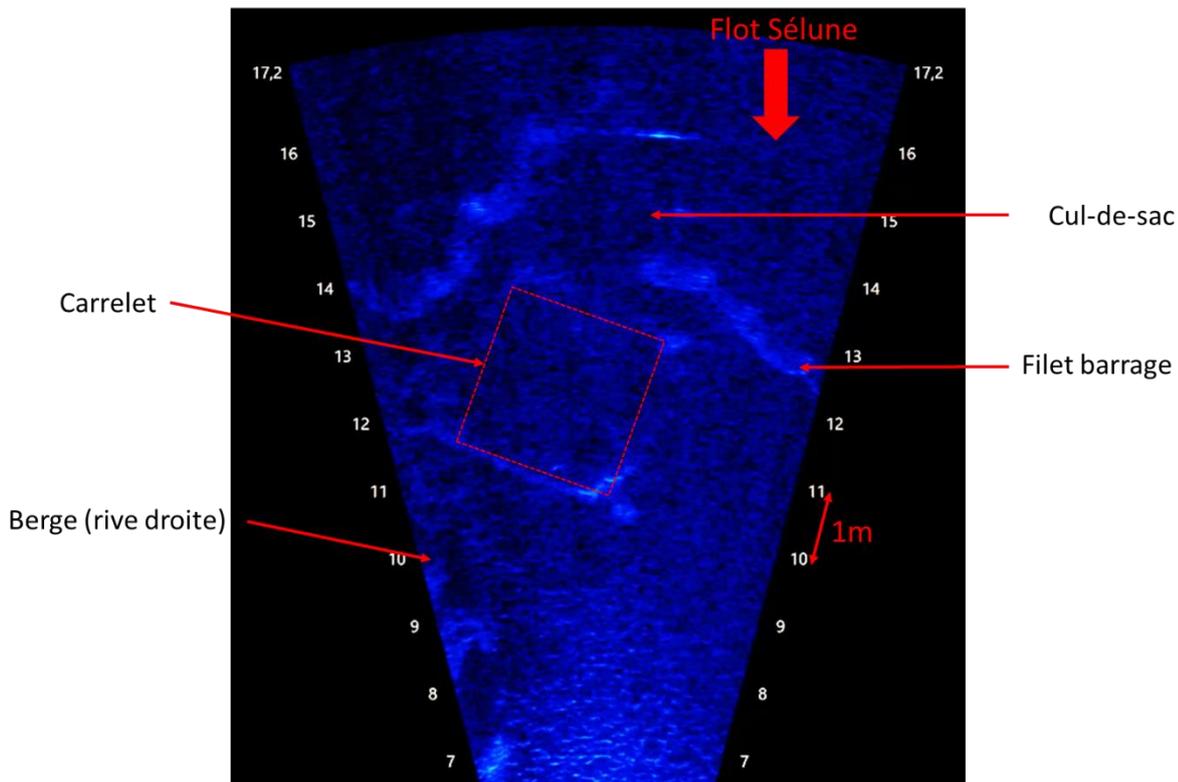


Figure 6 : Image obtenue à l'aide de la caméra acoustique ARIS (2019-2020).

Les caméras acoustiques sont des sonars multifaisceaux à très haute fréquence qui permettent d'observer directement la morphologie et le comportement des poissons sans impacter leur comportement ni altérer leur intégrité physique (Martignac *et al.*, 2015). La caméra envoie des signaux acoustiques dans le milieu et réceptionne tous les échos renvoyés par les objets se situant dans le volume couvert par son faisceau. Lors d'une installation fixe, les objets en mouvement, notamment les poissons, sont par conséquent faciles à différencier des échos renvoyés par le substrat ou les objets immobiles. La caméra ARIS (Sound Metrics Corp.), la plus utilisée, permet une observation sur des images d'une résolution fine, mais l'ouverture de son faisceau de détection est limitée à 30°. La caméra Oculus (Blueprint Subsea) compense sa résolution inférieure par une large ouverture de son faisceau (130°) et des dimensions plus réduites, facilitant son installation et sa logistique. Elle est de plus quatre fois moins onéreuse. Les acquisitions hydroacoustiques, avec l'une comme l'autre des caméras, sont visualisées en temps réel et permettent de relever le carrelet dès qu'un poisson adoptant le comportement d'un saumon en montaison et inclus dans la gamme de taille attendue passe sur le filet.

II.3.2. Prélèvements et biométrie

Les poissons capturés sont mesurés (longueur à la fourche) et pesés à l'aide d'un peson électronique (à partir de 2021). Des écailles sont prélevées pour des analyses sclérochronologiques (détermination de l'âge et de l'histoire de vie) ainsi qu'un morceau de nageoire pelvienne pour des analyses génétiques (détermination du sexe, notamment ; Quéméré *et al.*, 2014).

Tableau 1 : Liste des récepteurs fixes déployés sur la période 2019-2022. Les numéros associés aux récepteurs fixes renvoient aux éléments de la Figure 4.

ID	2019	2020	2021	2022	Cours d'eau
1	-	-	x	x	SELUNE
2	-	x	-	-	SELUNE
3	-	-	x	x	SELUNE
4	x	x	x	x	SELUNE
5	x	x	x	x	OIR
6	x	x	x	x	SELUNE
7	x	x	x	x	SELUNE
8	x	-	-	-	SELUNE
9	x	x	x	x	BEUVRON
10	-	-	x	x	SELUNE
11	-	-	-	x	SELUNE
12	-	x	x	x	SEE
13	-	x	x	x	COUESNON
14	-	x	x	-	OIR

II.4. Protocole de radio télémétrie et de biologging

II.4.1. Matériel utilisé

En 2019, une étude pilote avait permis de valider les grandes lignes du protocole (Lasne *et al.*, 2020). Pour cette étape, du matériel de télémétrie du fournisseur ATS® avait été emprunté. Dès 2020, du matériel neuf mieux adapté aux objectifs et contraintes du suivi a été acquis. Le choix s'est porté sur le système proposé par Lotek®.

II.4.1.1. Emetteurs

Des émetteurs-DST Lotek® du modèle [MCFT3-3A-TPA-L](#) (Figure 7) ont été choisis sur la base de différents critères : taille, autonomie de la batterie, nature du signal (codé), possibilité d'inclure des capteurs et enregistreurs de différents paramètres d'intérêt : température, pression (à partir de laquelle on peut estimer la profondeur), et accéléromètre.

Ces émetteurs émettent sur une des quatre fréquences suivantes : 150.500, 150.600, 150.700 et 150.800 MHz (dans notre cas), mais cela peut être davantage encore selon les objectifs et les protocoles. Chaque émetteur émet un signal radio codé, qui permet de transmettre des informations et en premier lieu l'identité du poisson. Il est également possible de transmettre les données instantanées mesurées par les capteurs, selon un patron cyclique choisi par l'opérateur et réglé en usine par le fabricant. Les émetteurs sont programmés pour émettre à intervalles régulier, en fonction notamment du nombre d'émetteur en circulation dans le milieu de façon à minimiser les collisions entre signaux.

Les réglages des différents paramètres de mesure, d'enregistrement et de transmission sont définis par l'utilisateur et réglés en usine. Dans notre cas, le matériel étant nouveau, des ajustements ont été opérés d'une année à l'autre (Tableau 2). Sur les émetteurs-DST sont inscrits l'adresse mail et le numéro de téléphone de la personne à contacter à l'attention des pêcheurs ou toute personne qui les trouverait.

Afin de limiter le taux de régurgitation (phénomène qui est estimé à 10-15% dans certains cas chez les salmonidés ; Smith *et al.*, 1998; Ramstad & Woody, 2003; Keefer *et al.*, 2004; Kennedy *et al.*, 2018), un anneau de silicone alimentaire est placé autour de l'émetteur avant insertion dans l'œsophage (Keefer *et al.*, 2004 ; Figure 7).

Les données stockées dans l'émetteur sont déchargées en connectant un module de communication (Lotek® DLC-2 ; Figure 8).



Figure 7 : Emetteurs-DST Lotek® du modèle [MCFT3-3A-TPA-L](#). Un anneau de silicone est placé autour de l'émetteur de façon à augmenter la rétention gastrique.

Tableau 2 : Paramétrage des émetteurs-DST Lotek® du modèle [MCFT3-3A-TPA-L](#).

Année de production	2020	2021	2022
Signal émis			
Burst interval (s)	2	2	2
Codage	Lotek 5	Lotek 5	Lotek 5
Power mode	regular power	regular power	regular power
Pulse width	extended life	extended life	extended life
Capteur de température (T)			
Temperature sensor scale	50 levels	50 levels	50 levels
Temperature range			
Temperature definition (°C)	0,8	0,8	0,8
Capteur de pression (P)			
Max value (psi/mbars/mH2O)	7/483/5	7/483/5	7/483/5
Capteur d'activité (A)			
Activity sensor enabled	yes	yes	yes
G-range	1.5	1.5	1.6
Sampling rate	12.5Hz	12.5Hz	12.5Hz
Value	mean	maximum	maximum
Sensor ratio transmission	T1: P:1 A:9	T1: P:1 A:3	T1: P:1 A:3
Enregistrement des données			
Logging interval	81s	22s	22s
Memory capacity	276	300	300
Paramètre des batteries			
Estimated life (jours)	331	414	414
Warranty life (jours)	265	331	331
Effectifs	45	45	45



Figure 8 : Module de communication Lotek® DLC-2

II.4.1.2. Récepteurs

Des récepteurs fixes Lotek® SRX800D2 et SRX1200D2 (pour les plus récents) ont été utilisés. Cette gamme d'émetteurs-récepteurs peuvent fonctionner sur une bande de fréquences de 138 à 176 MHz, mais les récepteurs sont paramétrés pour capter une gamme plus réduite :

- 138MHz – 146MHz
- 148MHz – 156MHz (notre cas)
- 160MHz – 168MHz
- 166MHz – 174MHz
- 168MHz – 176MHz



Figure 9 : Récepteurs fixes (gauche, SRX800D2 / SRX1200D2) et mobiles (droite, SRX800-MD2/SRX800-MD2) de la gamme SRX800 et SRX1200 pour les plus récemment acquis. Image : lotek.com.

Les récepteurs mobiles Lotek® SRX800-MD2 et SRX800-MD2 ont été utilisés. Ils fonctionnent sur accumulateurs (possibilité d'utiliser une prise allume-cigare pour le pistage en voiture). Le pistage mobile est effectué de façon hebdomadaire à l'aide d'une antenne [Yagi 3 brins](#). Ils sont équipés de GPS pour une géolocalisation des détections (ce ne sont pas les émetteurs qui sont géolocalisés mais les récepteurs). L'opérateur s'oriente le long de la rivière de façon à maximiser la force du signal reçu qui est indiqué sur l'écran LCD. Le poisson est ainsi localisé dans la dimension longitudinale du cours d'eau, pas dans la dimension transversale.

Les récepteurs fixes sont alimentés par batteries 12V raccordées en secteur, ce qui permet de palier les coupures électriques de courte durée (quelques jours maximum). Les antennes utilisées sont de type Yagi quand l'antenne est située assez loin du cours d'eau (plusieurs dizaines de mètres) ou d'antennes filaires quand l'antenne est située à proximité immédiate de la rivière (quelques mètres seulement). Le gain est contrôlé sur le récepteur et réglé de façon à isoler autant que possible le signal radio de l'émetteur d'éventuels parasites environnants : un gain fort permet de détecter l'émetteur plus loin mais amplifie aussi les parasites.

II.4.2. Marquage des saumons

Les poissons capturés sont placés dans un bac d'eau équipé d'un bulleur. La température est contrôlée de façon à rester proche de celle du milieu de capture. Les individus sont mesurés (longueur à la fourche), des échantillons de nageoire pelvienne sont réalisés dans la perspective d'analyses génétiques (génétique des populations, sexage), des écailles sont prélevées, un PIT Tag est inséré afin de permettre la détection sur les antennes RFID situées sur le bassin versant de l'Oir, le principal affluent rive droite de la Sélune en aval des barrages, dont la confluence est située en aval de Ducey, et enfin, l'émetteur est inséré dans l'estomac (Figure 10).

L'insertion se fait à l'aide de deux tubes PVC : un premier de diamètre intérieur légèrement supérieur au diamètre de l'émetteur, et un second de dimension inférieur. La procédure est décrite en Figure 11. Le bord du plus gros tube est poli de façon à limiter les lésions lors de l'insertion.

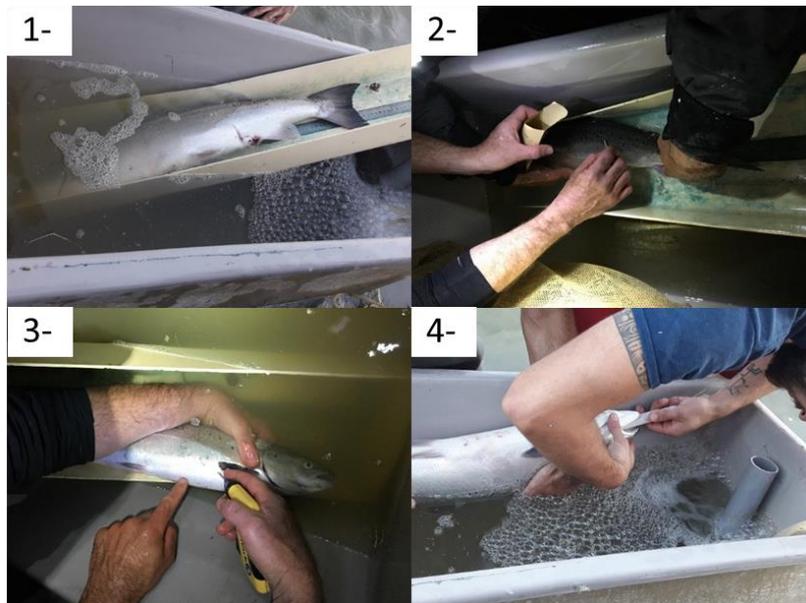


Figure 10 : Biométrie, prélèvements biologiques et marquage des individus. 1- mesure de la longueur à la fourche, 2- prélèvement d'écaïlle et d'échantillon de nageoire pelvienne, 3- insertion d'un PIT-tag et 4- insertion de l'émetteur.

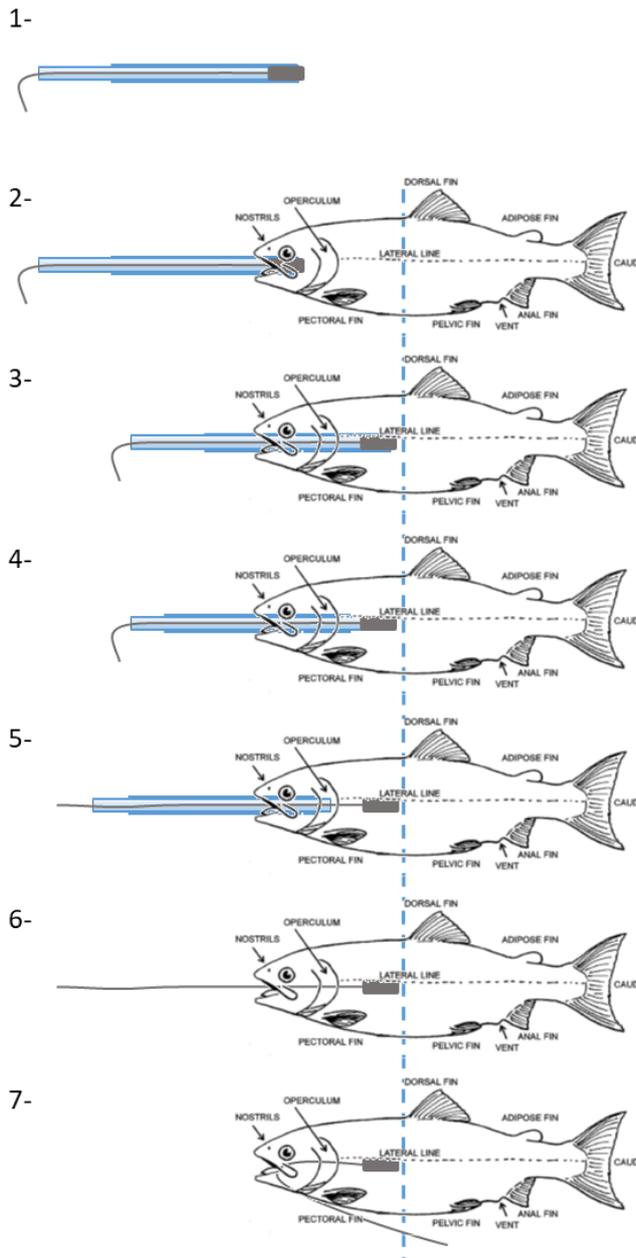


Figure 11 : Procédure d'implantation de l'émetteur dans l'estomac des poissons.

- 1- Placer l'émetteur à l'extrémité du tube fin en faisant passer l'antenne à l'intérieur du tube (l'émetteur n'est pas dans le tube, il est au bout du tube). Insérer cet ensemble dans le gros tube de façon à laisser dépasser l'émetteur d'environ 1 cm de ce gros tube. Maintenir l'émetteur dans cette position en bloquant l'antenne avec la paume de la main. Lubrifier l'émetteur et l'extrémité du gros tube avec de la glycérine ou de la vaseline.
- 2- Introduire l'émetteur par la bouche, en repérant l'entrée du tube digestif. Introduire l'émetteur dans le tube digestif, éventuellement en faisant pivoter l'ensemble tube+émetteur pour faciliter le passage.
- 3- Une fois introduit dans l'œsophage, le tube pénètre plus facilement jusqu'à une butée plus ou moins nette, correspondant à l'extrémité postérieure de l'estomac (représentée par une ligne pointillée bleue). La limite du fond de l'estomac se situant légèrement en avant de la nageoire dorsale, ne pas enfoncer l'ensemble tube+émetteur au-delà de cette limite qu'on aura pris soin de localiser à l'aide d'un repère sur le gros tube (il existe un risque de déchirement de l'estomac).
- 4- Une fois l'émetteur en bonne position, retirez de quelques centimètres le gros tube en le faisant coulisser autour du tube fin, en veillant à ne pas enfoncer davantage ce dernier. L'émetteur se retrouve expulsé dans l'estomac.
- 5- Retirer les tubes en laissant passer l'antenne en leur centre.
- 6- L'antenne se retrouve alors libre et sort par la bouche du poisson. Vérifier visuellement par la bouche, puis en tirant légèrement sur l'antenne que l'émetteur est bien dans l'estomac et non dans l'œsophage. S'il est en bonne position, il reste en place. Sinon, retirer l'émetteur et recommencer l'ensemble de la procédure décrite ci-dessus.
- 7- Laisser l'antenne se positionner naturellement.

II.4.3. Suivi des saumons

Les saumons sont suivis en combinant une approche passive en utilisant des récepteurs fixes et une approche active en utilisant des récepteurs mobiles.

- suivi passif :

Un jeu de récepteurs fixe Lotek a été déployé et géo positionné à des endroits stratégiques du bassin de façon à délimiter des tronçons de cours d'eau et identifier les bifurcations sur les affluents (Figure 4). Des antennes filaires (câbles dénudés à faible gain), omnidirectionnelle ou Yagi à fort gain sont utilisées selon les contextes. Les récepteurs sont alimentés sur batteries 12V elles-mêmes branchées sur secteur, l'ensemble étant placé dans des cantines.

- suivi actif

Chaque semaine, après avoir relevé les données enregistrées par récepteurs fixe et circonscrit les individus, un pistage actif est effectué à l'aide d'un récepteur mobile incluant un GPS et d'une antenne directionnelle Yagi. Il s'agit alors de localiser le plus précisément possible les individus le long du cours d'eau en se déplaçant sur la berge par bi-angulation et maximisation de la puissance du signal radio reçu. La précision de la localisation longitudinale dépend de nombreux facteurs difficiles à contrôler : profondeur de l'émetteur, topographie des berges, couvert végétal, conductivité de la rivière, puissance de l'émetteur etc. Etant donné la diversité des contextes possibles, aucun test de précision n'a été effectué. La position dans la dimension longitudinale est globalement estimée à environ 10-20m près.

II.4.4. Récupération des émetteurs

La localisation précise des émetteurs est possible en jouant sur le type d'antennes (omnidirectionnelle vs unidirectionnelle), sur le gain et en analysant la puissance du signal reçu qui donne une indication de la distance relative de la source d'émission. La récupération des émetteurs afin d'accéder aux données enregistrées peut se faire de différentes manières.

- a. Le poisson a été capturé par un pêcheur qui nous fait parvenir l'émetteur :

Les coordonnées de l'équipe sont indiquées sur l'émetteur. Par ailleurs, les pêcheurs sont informés via le site internet de la fédération de pêche de la Manche, des associations grands migrateurs locales (Seinormigr et Bretagne Grands Migrateurs), via la communication interne aux AAPPMA ou par des flyer ou panneaux d'information installés à proximité des principales zones de pêches de la Sélune.

- b. Le poisson est recapturé par pêche électrique à l'issue de la saison de reproduction dans la deuxième moitié de décembre.

En décembre, les poissons sont pistés sur les zones de frayère, et des pêches électriques ciblées sont mise en œuvre pour les capturer. Une fois capturés, le statut des individus est vérifié : s'ils ont frayé, ils sont sacrifiés par surdose d'anesthésiant selon un protocole approuvé par le comité d'éthique, car il existe un risque que le poissons dévale et rejoigne l'estuaire où ils ne sont plus accessibles. S'ils n'ont pas frayé, ils sont relâchés.

- c. L'émetteur est récupéré dans la rivière.

Une proportion importante des émetteurs se retrouve, après régurgitation ou mort et dégradation des poissons, au fond de l'eau. Si dans certaines situations, la récupération peut se faire à pied et à vue, la profondeur et la turbidité de l'eau rendent souvent l'opération complexe. Nous avons mis au point une méthode pour les situations plus complexes, efficace jusqu'à des profondeurs allant jusqu'à un peu plus de 2m selon les contextes (Figure 12). La nature du substrat et le niveau d'enfouissement de l'émetteur peuvent compliquer l'opération. Dans une zone de blocs par exemple, l'émetteur peut rester inaccessible. L'idéal est de procéder à la récupération de l'émetteur le plus rapidement possible afin d'éviter qu'il ne soit charrié dans de telles zones. La durée de vie de la batterie est également un facteur limitant. Dans le cas de cette étude, les émetteurs sont paramétrés de façon à émettre pendant plus d'un an, de façon à pouvoir être localisés bien après la saison de reproduction, et même à l'étiage suivant (durant lesquels les conditions sont plus favorables).

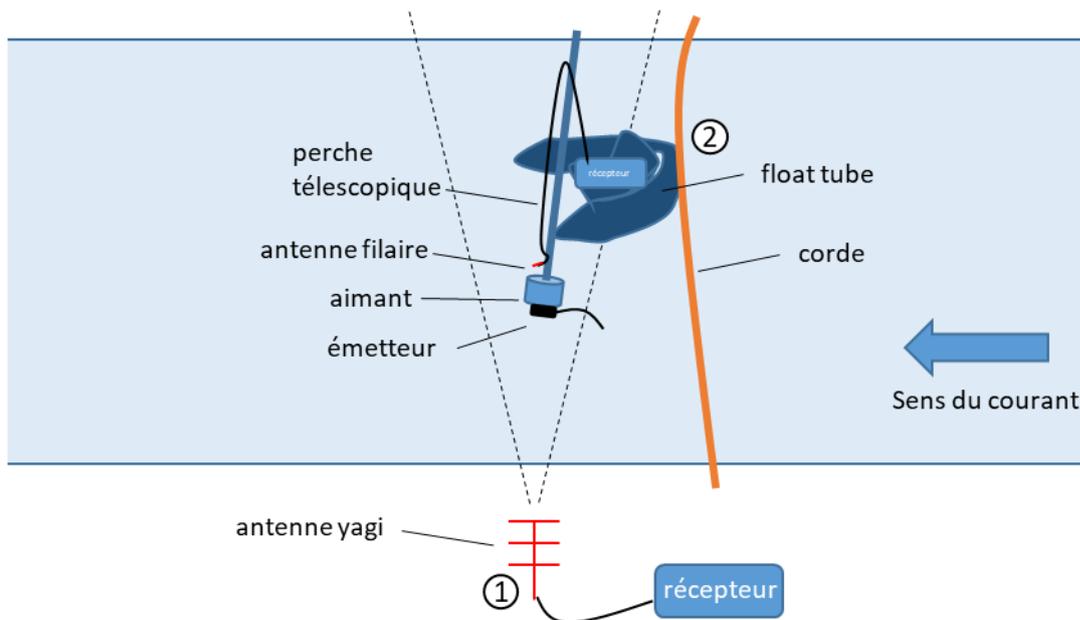


Figure 12 : Méthode employée pour récupérer les émetteurs sur le fond de la rivière. Dans une première étape (1), la position longitudinale de l'émetteur est circonscrite à l'aide de l'antenne directionnelle (yagi) le plus précisément. Dans une deuxième étape (2), un opérateur localise plus précisément l'émetteur à l'aide d'une antenne faible gain (câble RG58 dénudé sur quelques millimètres seulement) fixée à l'extrémité d'une perche télescopique et couplée à un aimant puissant. L'installation d'une corde en travers de la rivière facilite le positionnement et la stabilisation du float tube. Il rapproche l'antenne de l'émetteur en maximisant la puissance du signal et en jouant sur le niveau de gain du récepteur et en réduisant ce dernier.

II.5. Données environnementales

La température et le débit sont mesurés toutes les six minutes sur le cours principal de la Sélune à la station de mesure du pont de Signy (48°35'46.4"N 1°17'34.5"W ; Le Gonidec *et al.*, 2016). Un intérêt particulier sera porté aux températures estivales pour les mettre en regard des températures limites connues pour les saumons.

III. Résultats

III.1. Conditions environnementales

Températures

Les températures moyennes journalières estivales sur la période 2016-2021 sont très variables selon les années. Globalement, les mois de juin à septembre sont les plus chauds, avec des températures moyennes journalières dépassant régulièrement les 20°C, avec de forts contrastes entre années (Figure 13).

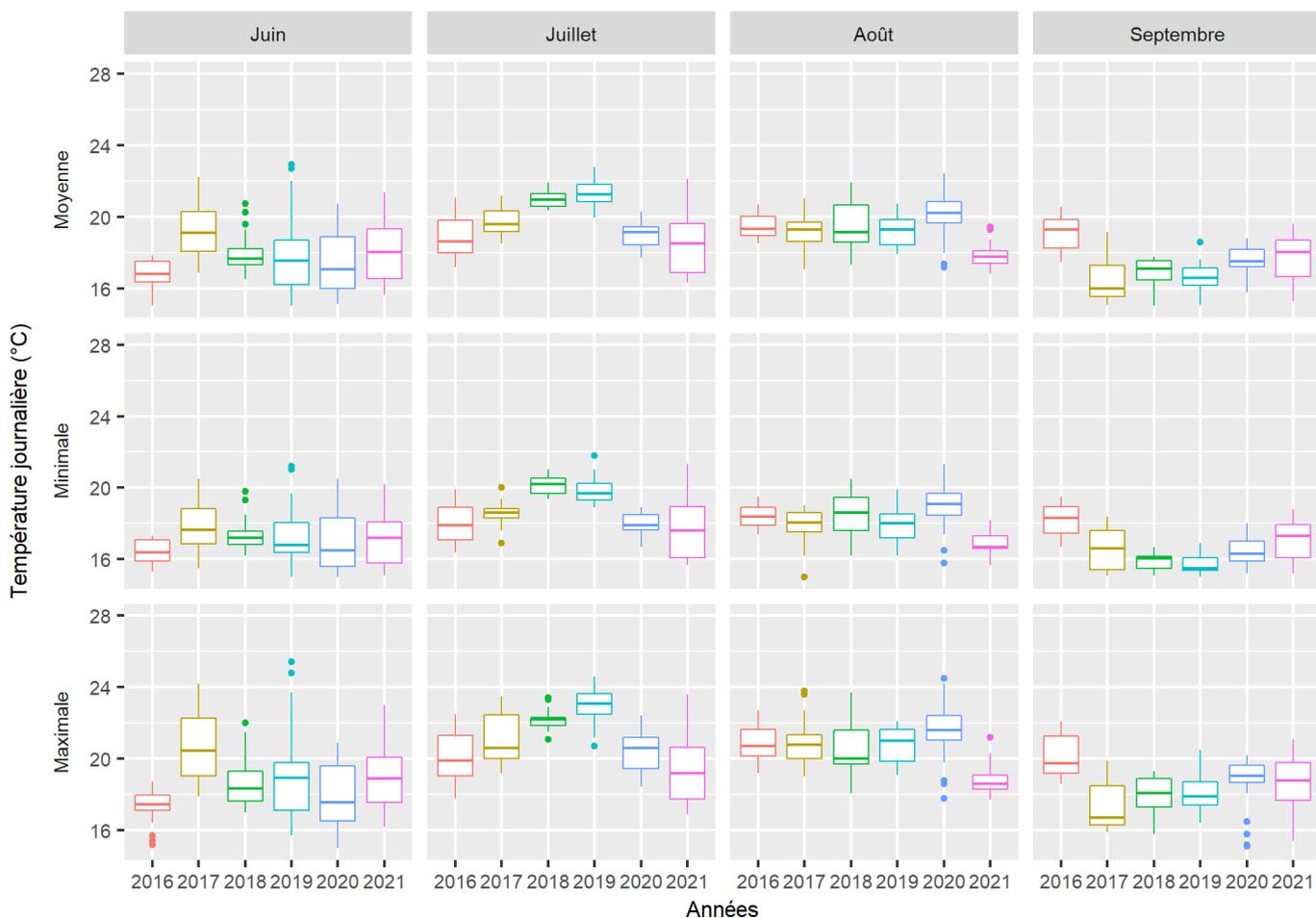


Figure 13 : Températures journalières minimales, maximales et moyennes enregistrées dans la Sélune au pont de Signy en fonction des années pour les mois de juin à septembre pour la période 2016-2021. Données UMR SAS.

Différents indicateurs peuvent être utilisés pour rendre compte des variations thermiques et des contraintes exercées sur les saumons, par exemple le calcul du nombre de jours de l'année au-delà d'une valeur de température donnée, qui peut être choisie en fonction des connaissances de la biologie de l'espèce (Figure 14). Sur la base des données disponibles, un intérêt plus particulier sur les températures situées au-delà de 20°C semble pertinent puisqu'elles sont situées au-delà de l'optimal thermique des saumons et donc susceptibles d'affecter le comportement ou la survie des saumons.

Selon les années, la température moyenne journalière dépasse les 20°C pendant une période allant d'une dizaine de jours (2021) à plus d'une quarantaine (2018, 2019). Les moyennes dépassent plus rarement 22°C (au maximum 7 jours, en 2019). Les températures minimales sont au-delà de 20°C pendant des périodes allant de 0 à 23 jours (en 2016 et 2018, respectivement). Les températures maximales peuvent dépasser 25 °C (1 jour en 2019), et dépassent plus fréquemment 23°C (de 0 à 21 jours en 2016 et 2019, respectivement). Les étés 2018 et 2019 sont globalement plus chauds que les autres.

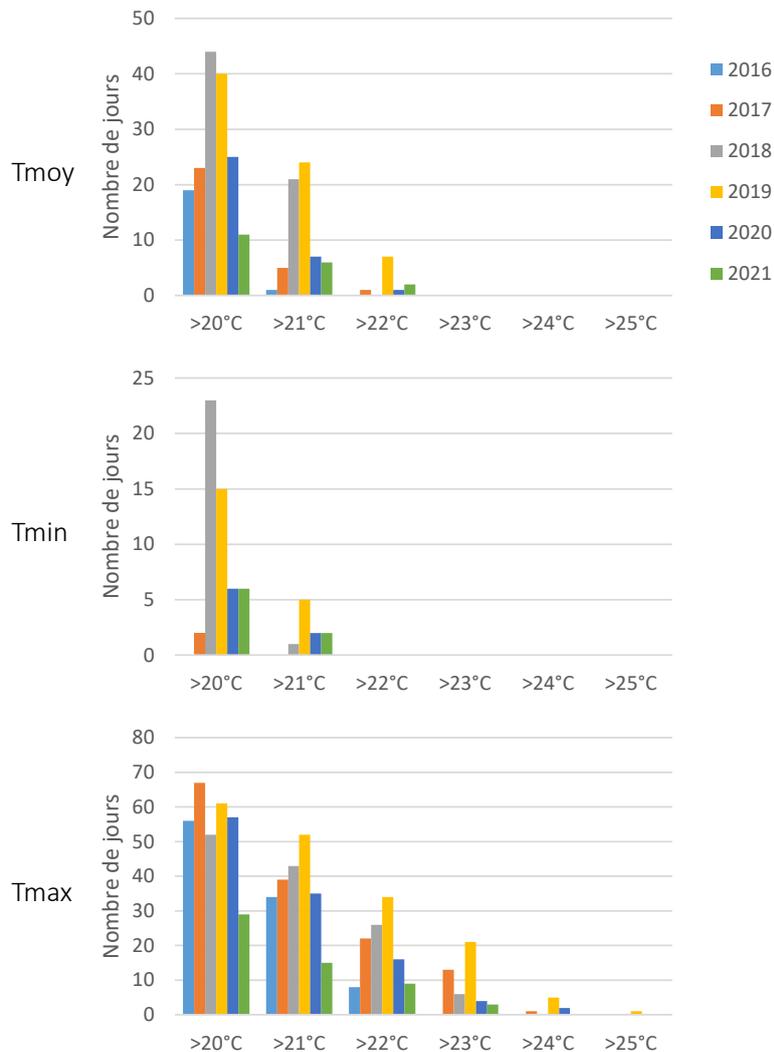


Figure 14 : Nombre de jours où la température moyenne, minimale et maximale mesurée dans la Sélune au pont de Signy dépasse la valeur indiquée, pour la période 2016-2021. Données UMR SAS.

Débits

Les débits mesurés au Pont de Signy sur la période 2016-2021 varient entre 1.05 et 86.3 m³/s. Le débit médian est de 5.2 m³/s. Les débits en début de période de migration des saumons de printemps sont variables selon les années mais globalement rythmés par des augmentations de débit au-delà de 15m³/s (mars-juin). La période suivante (juillet-septembre) correspond à l'étiage qui est à son maximum fin août début septembre. Les augmentations de débits à cette période sont rares, et les débits soutenus jusqu'en 2021 par le barrage de la Roche-Qui-Boit.

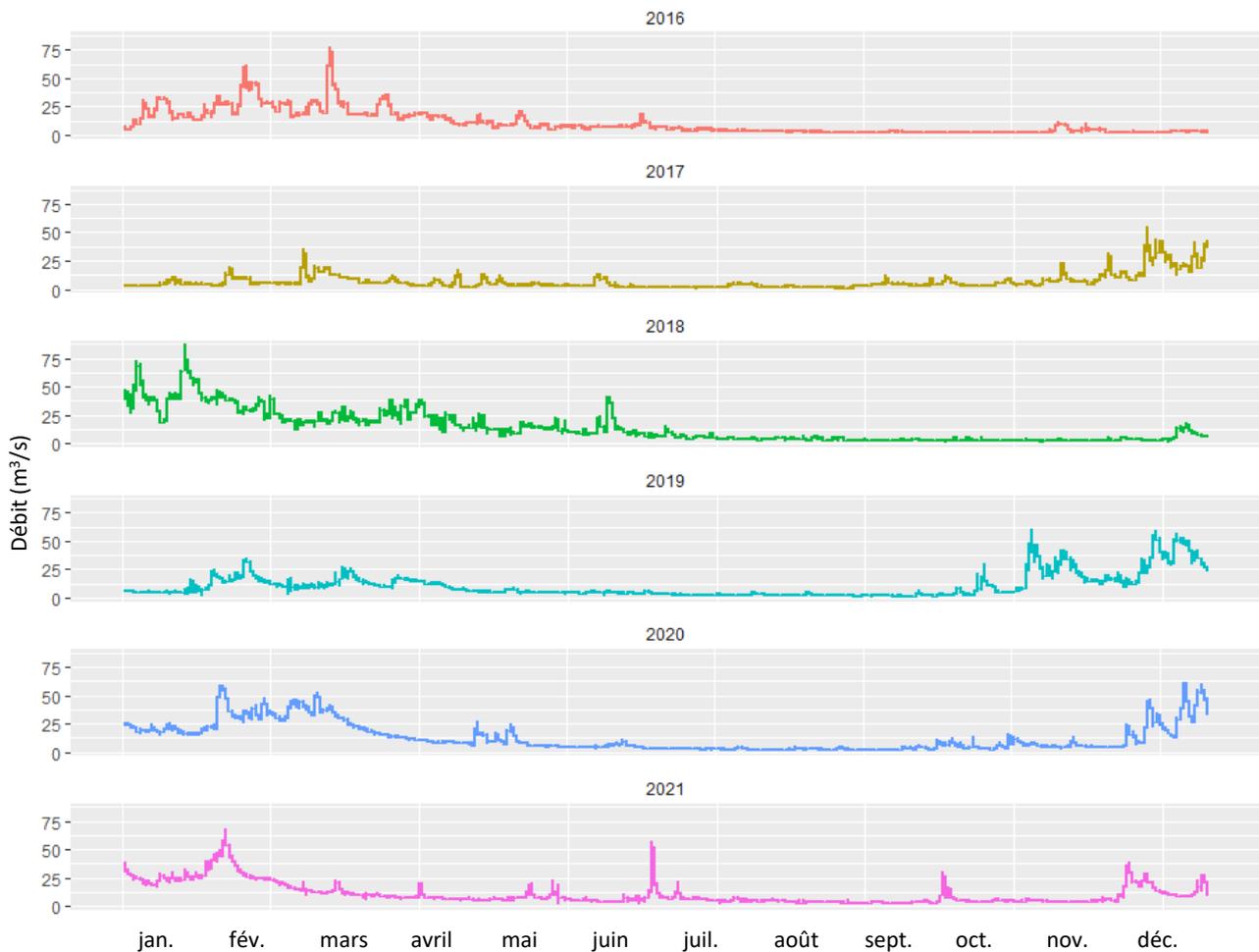


Figure 15 : Débits mesurés au Pont de Signy. Données UMR SAS.

III.2. Données biologiques

III.2.1. Effort de capture et échantillon de saumons marqués

Les sessions de captures se sont déroulées entre avril et mi-juillet en 2019 et entre mai et août en 2020 et 2021 (Tableau 3). Les conditions de pêche – débit assez important, Sélune non entièrement barrée – et les effectifs assez faibles entre avril et début juin expliquent probablement les captures nulles à cette période, et les années suivantes, l'effort s'est concentré essentiellement entre juin et début août (Tableau 4, Tableau 5). Les marées ciblées correspondaient à des coefficients moyens à élevés (typiquement entre 50 et 80). Aux alentours de 80 environ et au-delà, la marée submerge l'installation la rendant inopérante pendant toute la montée des eaux et une bonne partie du reflux, avec le risque de voir piégés des débris végétaux dans le filet. Les petites marées sont dites moins propices au passage des saumons de 1 hiver de mer, mais les données scientifiques à ce sujet sont très lacunaires. Par ailleurs, les sessions nocturnes sont privilégiées, les passages de saumons se faisant a priori davantage en condition de faible luminosité et de nuit (d'après les observateurs locaux notamment les agents de l'USM de l'OFB). De plus, l'été, les conditions thermiques sont plus adaptées à la manipulation des poissons quand l'eau est plus fraîche. Au final, les données obtenues ne permettent pas d'évaluer rigoureusement les conditions optimales favorisant la migration et donc la capture des saumons. Ce n'était d'ailleurs pas l'objectif de l'étude et le protocole n'y était pas adapté.

Les sessions de captures au carrelet en estuaire commencent en mai-juin, selon les conditions hydrologiques, mais les sorties infructueuses sont très courantes avant juillet et les effectifs capturés ne sont significatifs (i.e. plusieurs individus par sessions) qu'à partir de fin juin (Figure 1). L'essentiel des sessions de ne génèrent que quelques captures (typiquement de 1 à 5). La première quinzaine de juillet est plus prolifique, les meilleures sessions permettant de capturer jusqu'à une quinzaine d'individus comme par exemple deux nuits consécutives mi-juillet 2019 où 15 et 8 individus ont été capturés lors de passages massifs. A noter que la durée des sessions est également déterminée par les captures effectuées. En fonction des effectifs capturés, les sessions peuvent se prolonger jusqu'à début août jusqu'à ce qu'au moins une trentaine d'individus soit marqués.

Tableau 3 : Synthèse des captures effectuées au Gué de l'Epine en 2019. SAT = Salmo salar, TRM = Salmo trutta trutta, ALA = Alosa alosa, * longueur à la fourche, en mm.

Date	Coefficient de marée	Horaire	Total des captures (migrateurs)	Longueur* SAT	Longueur* ALA	Longueur* TRM
01/04/2019	50	12h00-20h00	-			
02/04/2019	61	11h00-19h30	1 SAT (post-repro)	759		
29/04/2019	35	10h00-21h00	-			
30/04/2019	45	8h30-17h00	-			
09/05/2019	77	18h45-1h00	1 ALA		542	
21/05/2019	84	19h00-22h00	-			
23/05/2019	63	20h00-1h00	6 ALA		486; 555; 569; 564; 497; 497	
14/06/2019	70	22h00-7h30	1 ALA		544	
19/06/2019	78	19h40-00h15	-			
01/07/2019	81	22h00-8h00	5 SAT, 2TRM	515; 609; 560; 560; 533		310; 313
09/07/2019	72	19h00-2h30	2 SAT	614; 561		
15/07/2019	71	20h00-6h00	15 SAT	565; 755; 615; 440; 607; 543; 630; 562; 550; 552; 590; 575; 608; 540; 490		
16/07/2019	82	20h00-3h00	8 SAT, 1 TRM	563; 563; 561; 534; 570; 558; 527; 590		310

Tableau 4 : Synthèse des captures effectuées au Gué de l'Epine en 2020. SAT = Salmo salar, TRM = Salmo trutta trutta, ALA = Alosa alosa, * longueur à la fourche, en mm.

Date	Coefficient de marée	Horaire	Total des captures (migrateurs)	Longueur* SAT	Longueur* ALA	Longueur* TRM
20/05/2020	70	18h45-21h30				
02/06/2020	73	17h36-21h30				
03/06/20	83	18h00-23h00	1 SAT	755		
18/06/20	61	19h52-23h53				
24/06/20	78	17h20-01h20	3 SAT	550; 566; 605		
25/06/20	74	18h45-01h30	4 SAT	616; 580; 583; 598		
30/06/20	60	20h05-00h45	1 SAT	569		
02/07/20	78	20h30-07h00	8 SAT, 1 TRM	585; 589; 565; 617; 583; 595; 562; 625 537; 552; 600; 574;		318
08/07/20	77	20h45-06h45	12 SAT	649; 602; 636; 652; 634; 632; 632; 586		
16/07/20	43	20h30-04h30	5 SAT	602; 627; 612; 601; 609		

Tableau 5 : Synthèse des captures effectuées au Gué de l'Epine en 2021. SAT = Salmo salar, TRM = Salmo trutta trutta, ALA = Alosa alosa, * longueur à la fourche, en mm.

Date	Coefficient de marée	Horaire	Total des captures (migrateurs)	Longueur* SAT	Longueur* ALA	Longueur* TRM
06/05/2021	51	18h00-22h45				
10/05/2021	78	17h50-00h00	7 ALA		515; 487; 512; 534; 532; 530; 454	
31/05/2021	64	22h50-00h35	2 ALA, (1 ALA)		450; 470; 530	
07/06/2021	63	18h35-00h02	(1 ALA)		NA	
10/06/2021	73	19h10-00h00	2 ALA		535; 460	
21/06/2021	68	18h30-00h15				
01/07/2021	51	19h00-00h55	2 SAT	571; 563		
06/07/2021	51	18h50-22h00				
08/07/2021	63	18h30-01h55	6 SAT	578; 579; 579; 578; 619; 620		
12/07/2021	76	19h20-03h10	3 SAT	583; 552; 598		
16/07/2021	63	18h30-04h20	(1 ALA), 6 SAT	568; 587; 584; 593; 615; 565	NA	
19/07/2021	57	19h14-03h00	1 ALA, 1 SAT	564	459	
21/07/2021	67	18h30-03h30	2 SAT	610; 595		
29/07/2021	66	19h27-04h00	7 SAT	619; 599; 578; 640; 657; 615; 620		
04/08/2021	41	19h30-02h00	5 SAT	594; 524; 598; 589; NA		

Un échantillon de 98 saumons a été marqué sur la période 2019-2021, 30 en 2019, 34 en 2020 et 34 en 2021. En 2020, parmi les 34 individus marqués, trois saumons de printemps (2 hivers de mer) ont été capturés, marqués et relâchés en mai à la station de comptage de poissons migrateurs de Cerisel, sur l'Oir, affluent de la Sélune, dans l'objectif d'avoir un supplément d'information sur cette catégorie d'individus, difficile à capturer en estuaire pour deux raisons principales. Tout d'abord, comme évoqué précédemment, au moment du passage de l'essentiel des saumons de printemps en estuaire, entre février et mai, les conditions hydrologiques rendent difficile l'installation du matériel de capture et réduit l'efficacité de l'installation (la Sélune étant plus large en condition de débits printanier, le filet barrage ne peut barrer l'ensemble du lit et la pêche peut être plus dangereuse (risque de noyade et risque pour le matériel). Les effectifs de saumons de printemps sont plus également plus faibles que ceux des castillons et l'effort de pêche devrait être démultiplié pour espérer un bon rendement. Des tentatives ont bien été effectuées dès avril en 2019, mais elles se sont avérées infructueuses. La suite de l'effort de capture s'est donc concentré sur juin et juillet, période de passage des castillons (1 hiver de mer). Quelques individus de saumons de printemps tardifs peuvent néanmoins être capturés à cette période (1 en 2020 et 1 en 2021).

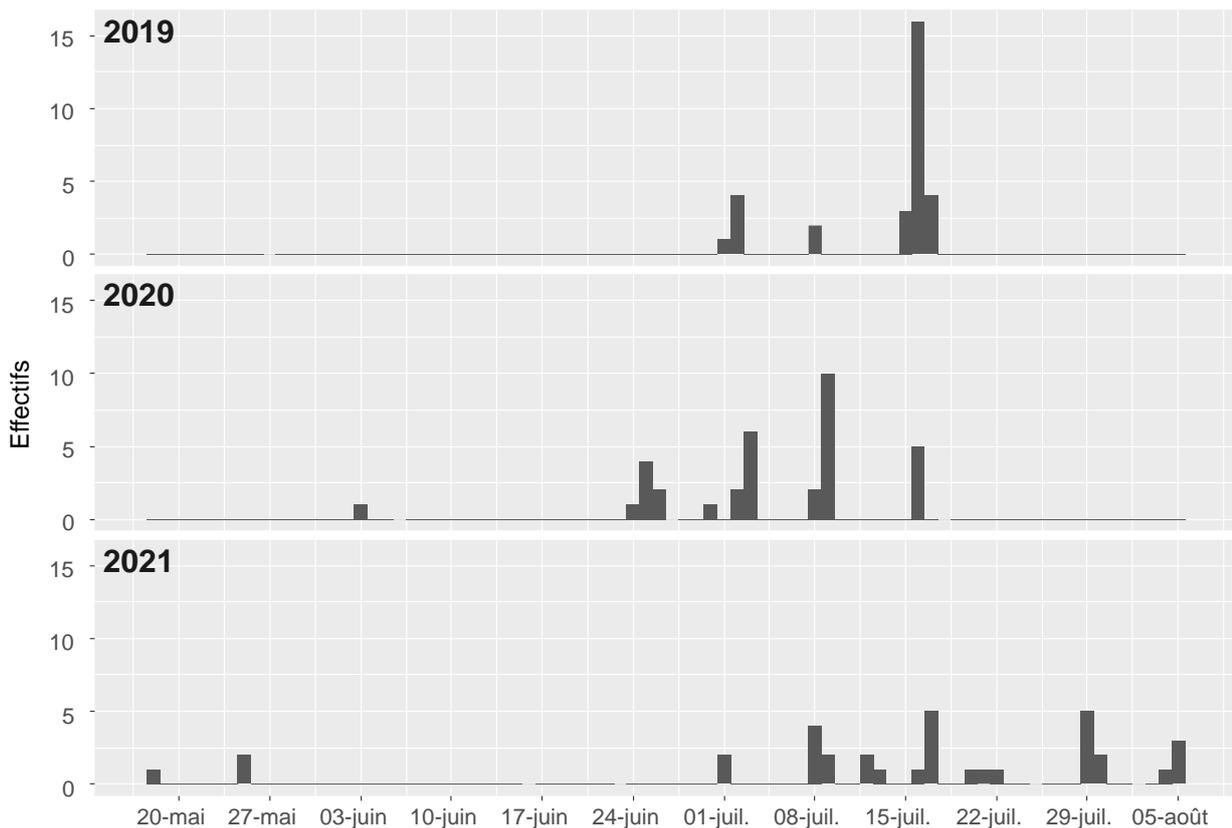


Figure 16 : Date de capture des saumons de 2019 à 2021. Exceptés les 3 individus capturés en mai 2021 à la station de comptage de poissons migrateurs de Cerisel sur l'Oir, les saumons ont été capturés en estuaire de Sélune.

La taille (longueur à la fourche) des poissons capturés au cours des trois années varie entre 440 et 797mm, avec une médiane de 588mm (Figure 17). La taille moyenne des castillons n'est pas homogène sur la période. Les poissons marqués en 2019 sont significativement plus petits (562mm \pm 34) que ceux de 2020 (598mm \pm 29) et 2021 (591mm \pm 27). Les individus marqués en 2020 et 2021 sont de taille similaires (ANOVA, $p < 0.0001$).

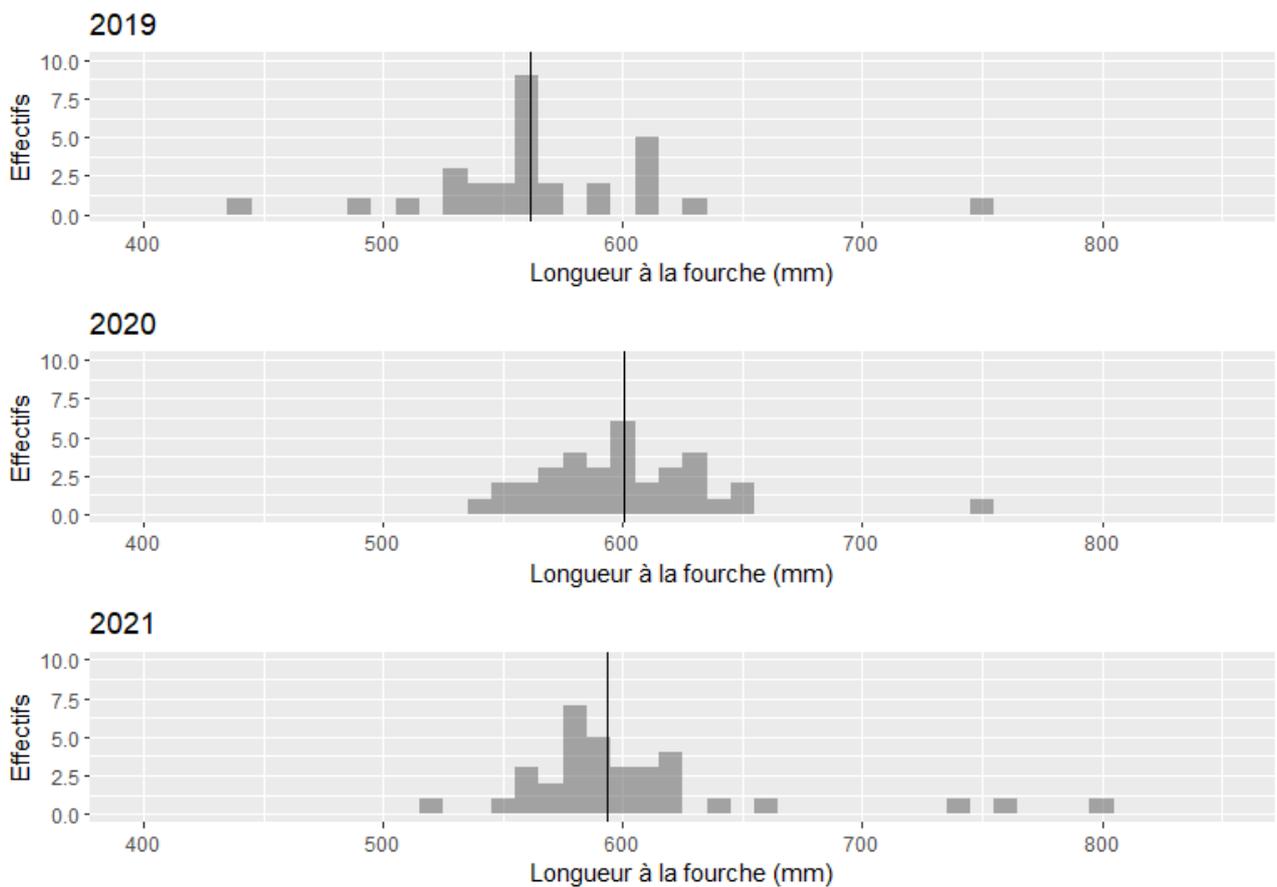


Figure 17 : Distribution des tailles de saumons capturés et équipés de 2019 à 2020. Les lignes verticales indiquent pour chaque année la longueur médiane.

III.2.2. Données générales

Le pourcentage de poissons marqués suivis jusqu'à la reproduction est compris entre 23 et 38% selon les années (Tableau 6). Il est difficile de distinguer mortalité naturelle, mortalité liée à la capture et au marquage, et régurgitation de l'émetteur. Lorsque les individus sont définitivement immobiles, par précaution, on parle de mortalité apparente plutôt que de mortalité. Le taux de régurgitation est néanmoins supposé faible, et la mortalité à court terme liée à la capture et à l'implantation de l'émetteur également puisqu'en général, les poissons reprennent immédiatement leur migration et parcourent plusieurs kilomètres dans les heures qui suivent. Sur la période 2019-2021, 7.1% des individus sont détectés 'immobiles' 6 jours après le marquage, et 14.3% après 15 jours. Il est à noter cependant que ces pourcentages sont très fortement dus à la cohorte suivie en 2019 où les conditions d'hydrologie et de température étaient particulièrement stressantes. Par ailleurs, en 2019, les émetteurs n'étaient pas équipés d'anneau anti-régurgitation comme c'est le cas pour les années suivantes, entraînant un possible biais impossible à quantifier. Les effets à plus long terme, s'ils existent, sont quant à eux plus difficile à appréhender. La mortalité apparente est assez forte pendant la période estivale (entre 47 et 71% de mortalité avant fin août ; Figure 18). La majorité des poissons détectés immobiles le sont dans la partie basse de la Sélune, en aval de Ducey, et quelques un le sont entre Ducey et le barrage de la Roche-Qui-Boit.

C'est pendant la période estivale que la mortalité est la plus forte, les saumons étant exposés à différentes pressions (Figure 18). La mortalité par pêche, estimée d'après les retours des pêcheurs de loisirs (sur la base du volontariat), représente environ 10% et 12% des effectifs de poissons

marqués en 2019 et 2020 (Tableau 6). Aucune capture n'a été déclarée en 2021 alors que dans un même temps quelques individus ont disparu en aval de Ducey. Les températures élevées, la rupture de connectivité, et la prédation sont également possiblement impliquées dans la mortalité apparente (voir paragraphes suivants).

On observe à l'automne également (octobre-novembre), pendant la dernière étape de la migration vers les zones de reproduction, une deuxième vague de mortalité sans que l'on puisse pour l'instant en préciser les causes (Figure 18).

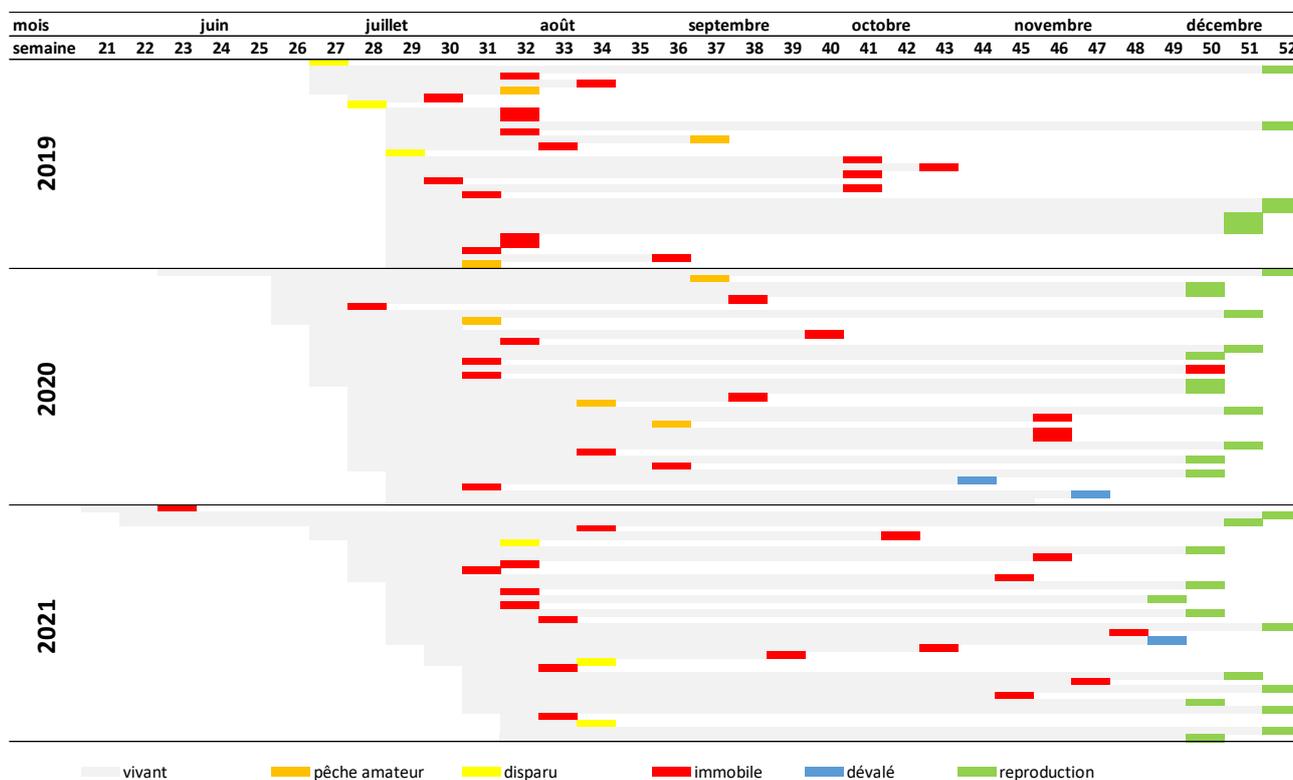


Figure 18 : Devenir des 98 saumons marqués et suivis par radiotélémetrie de 2019 à 2021.

Tableau 6 : Devenir des 98 saumons marqués sur la période 2019-2021

Devenir des saumons	des 2019 (N=30)	2020 (N=34)	2021 (N=34)
pêche amateur	10%	12%	0%
disparu	10%	0%	9%
immobile	57%	44%	50%
dévalé	0%	6%	3%
reproduction	23%	38%	38%

III.2.3. Données spatiales

Trajectoires individuelles et habitats utilisés²

² Les données issues du suivi 2021 ne sont pas incluses ici. Elles feront l'objet d'un stage de Master2 qui commencera en février 2023, et seront intégrées dans le livrable suivant.

La compilation et l'analyse des trajectoires individuelles issues des suivis des 2019 et 2020 (Figure 19, Figure 20) permettent globalement de valider le modèle de Milner (2012 ; Figure 1) décrivant :

- 1- une rentrée rapide en eau douce depuis l'estuaire, dans la foulée du marquage,
- 2- un arrêt estival en partie basse (généralement entre la limite de salure des eaux et la confluence avec l'Oir). Cet arrêt est très net pour certains individus qui bougent très peu voire pas, et moins strict pour d'autres qui peuvent montrer des mouvements (rarement plus de 5 km).
- 3- une reprise de la migration vers les frayères à l'automne à la faveur des augmentations des débits.

L'essentiel des individus réalise l'arrêt estival dans les parties basses de la Sélune, en aval de Ducey et de la confluence avec l'Oir. Pour ces individus, l'absence globale de détection par le récepteur situé juste en amont du seuil de Ducey et réglé de façon à détecter les individus qui se présentent en aval du seuil (Figure 19, Figure 20) tend à écarter l'hypothèse qu'ils ont été bloqués en aval à cause de cet obstacle. Mais si ces données ne montrent pas d'effet bloquant sur ces saumons de 1 hiver de mer, elles ne permettent pas non plus de montrer qu'il est transparent. L'examen des trajectoires individuelles sur une période plus longue permettra d'apporter des informations plus précises à ce sujet à l'issue de l'étude post-arasement, dans des conditions hydrologiques variées.

Les habitats de la partie basse de la Sélune contrastent avec ceux situés entre le seuil de Ducey et le barrage de la Roche-Qui-Boit. Le courant y est plus lent, la profondeur plus importante en moyenne, même si des profonds sont également présents notamment dans les biefs des seuils de Ducey et de Quincampoix. La marée dynamique remonte haut dans la partie basse jusqu'à Ducey lors des grands coefficients et quand les débits de la Sélune sont faibles. La ripisylve y est aussi bien développée, fournissant un ombrage important et tamponnant probablement la température de l'eau en été. Les données quantitatives sur les habitats sont cependant trop lacunaires pour une analyse plus poussée.

Les déplacements automnaux peuvent être très amples, avec notamment des mouvements vers les bassins versant voisins (Sée, Couesnon ; Tableau 7). Sur la période 2019-2021, 6 individus sur 32 ayant été suivis jusqu'à la reproduction ont changé de bassin versant quelques semaines ou quelques jours avant la reproduction soit environ 19%. Il est à noter qu'un comportement de dévalaison vers les parties les plus basses de la Sélune précédant la migration sur les frayères est observée dans certains cas (exemple Figure 19, Figure 20). Ce comportement de dévalaison permet probablement aux individus de s'orienter en recherchant les signaux olfactifs familiar indiquant la direction de la zone natale (Keefer & Caudill, 2014). Une hypothèse est que les conditions de faibles débits en été ne permettent pas aux individus de capter les signaux olfactifs nécessaires à leur orientation et ils ne discriminent pas correctement les eaux de la Sélune de la Sée et du Couesnon, ou au sein d'un bassin versant donné, les différents affluents (ex : Oir et Beuvron dans le cas de la Sélune). En automne, avec des débits plus importants, le paysage olfactif se fait plus net. Lorsque les odeurs provenant de l'amont ne correspondent pas à celles recherchées, les saumons dévalent en aval des confluences et à ré-entreprennent alors de migrer. L'orientation pendant la période d'étude a peut-être également été perturbée par l'abondance des sédiments en lien avec les vidanges et les travaux au niveau des barrages.

Des individus se présentent au pied ou à proximité immédiate (<1km) du barrage de la Roche-Qui-Boit, pour l'essentiel à l'automne (0% en 2019, 24% (n=8) en 2020 et 24% (n=8) en 2021). Parmi ces individus, certains sont morts à proximité immédiate du barrage (3 en 2020 et 3 en 2021) : leurs émetteurs ont été détectés dans le bassin situé sous l'ancienne usine hydro-électrique qui ne correspond pas à l'habitat des saumons, car trop lentique. Il y a suspicion de prédation par le silure (*Silurus glanis*). En effet, plusieurs grands silures ont été capturés juste en aval du barrage, avant la

pêche de vidange au printemps 2022. Les autres individus se sont soit reproduits sur la Sélune un peu plus en aval (n=3 en 2020) soit dans les affluents (Beuvron n=3, Oir n=1 en 2021). En 2020, deux individus sont morts quelques centaines de mètres en aval du barrage et en 2021 un individu est redescendu en aval de Ducey et y est mort.

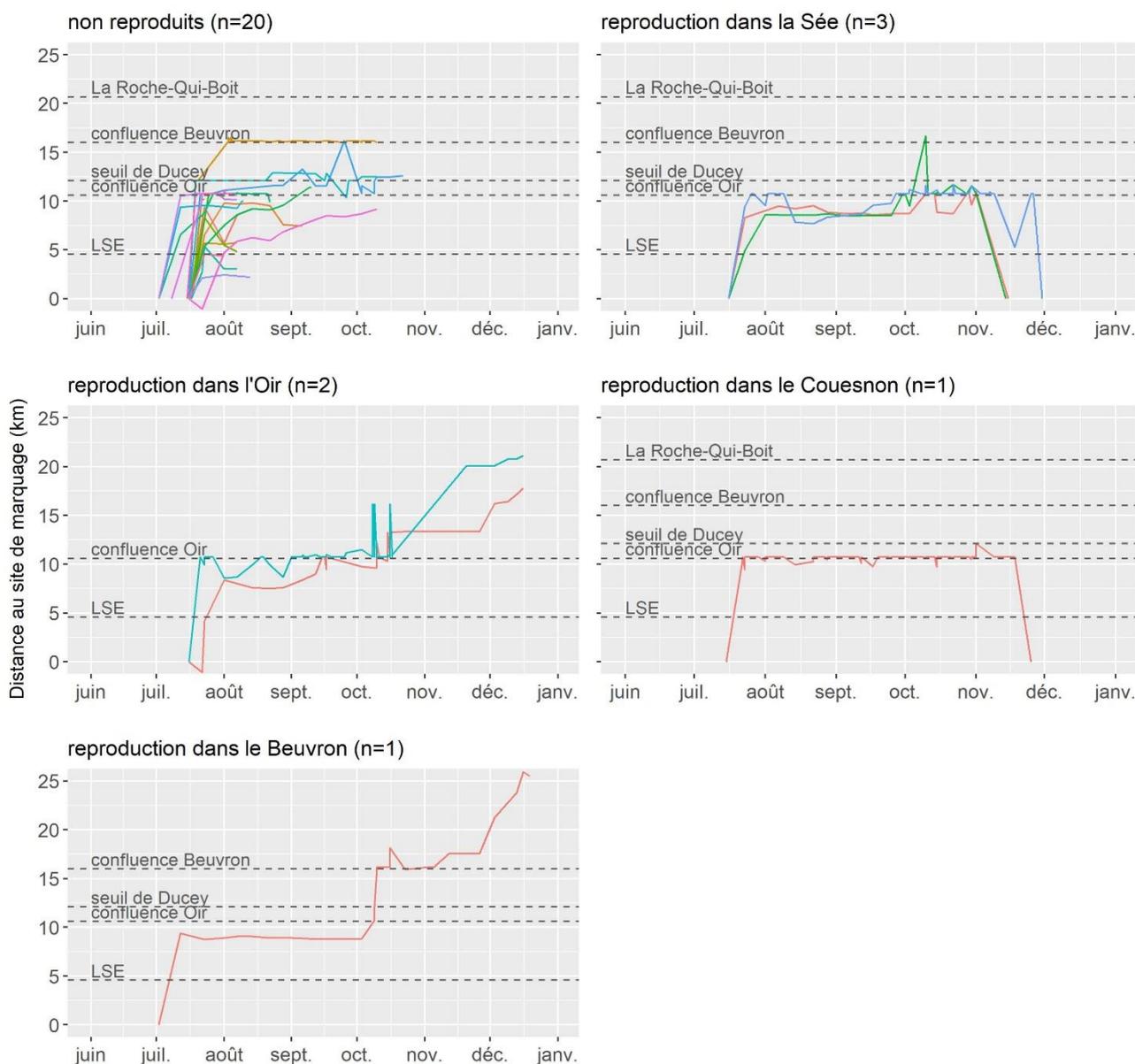


Figure 19 : Trajectoires des saumons suivis en 2019 dans le bassin de la Sélune. Les individus sont regroupés en fonction de la rivière où ils se sont reproduits. La localisation de divers points d'intérêt est indiquée par des lignes en pointillés (LSE= Limite de Salure des Eaux).

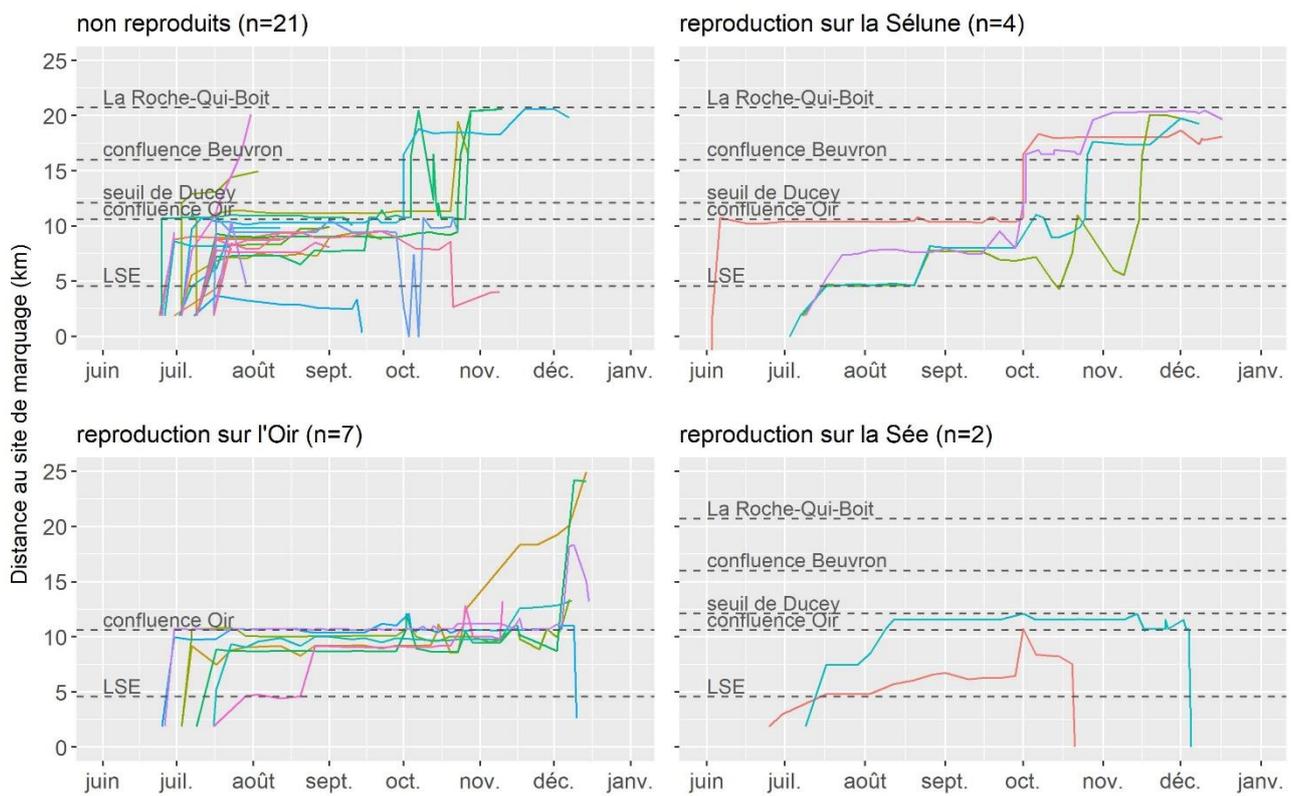


Figure 20 : Trajectoires des saumons suivis en 2020 dans le bassin de la Sélune. Les individus sont regroupés en fonction de la rivière où ils se sont reproduits. La localisation de divers points d'intérêt est indiquée par des lignes en pointillés (LSE= Limite de Salure des Eaux).

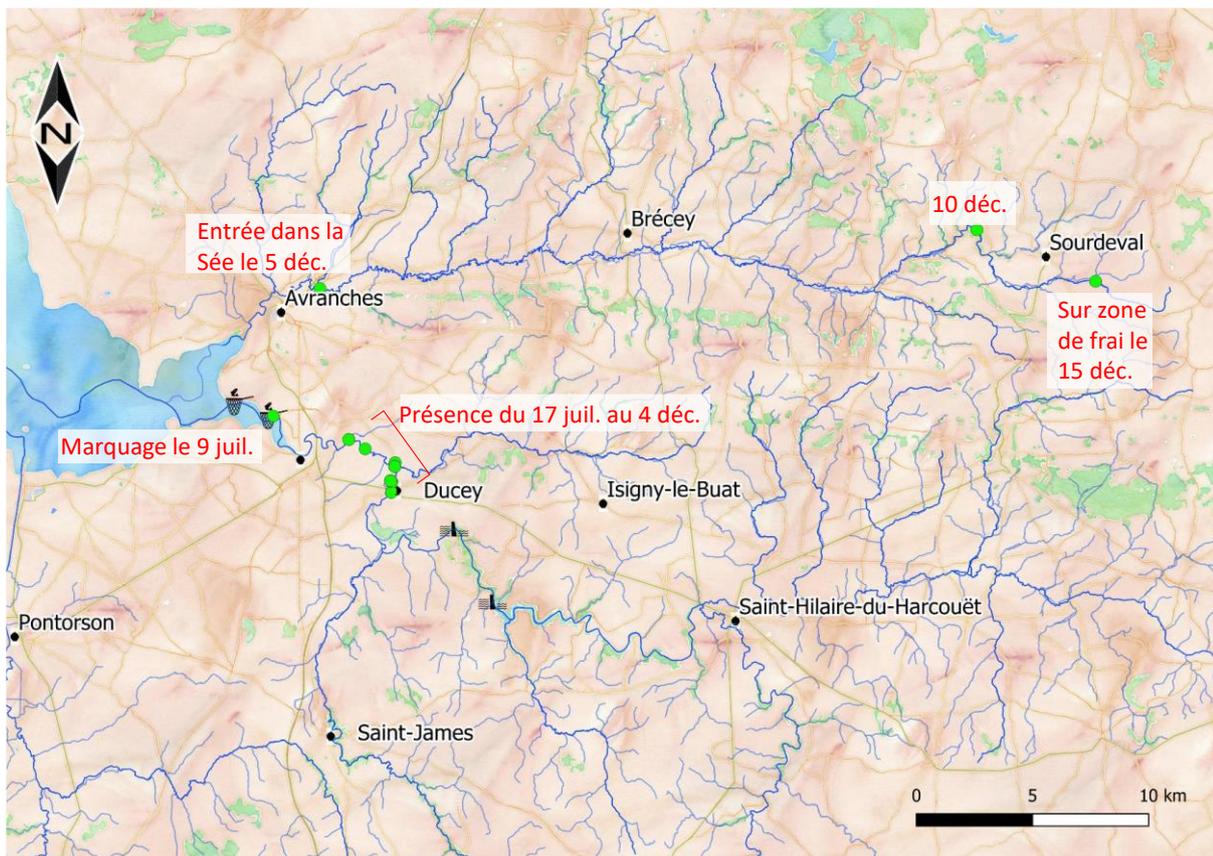


Figure 21 : Déplacements d'une femelle saumon au cours de la saison 2020.

Tableau 7 : Distribution des saumons ayant été suivis jusqu'à la période de reproduction (décembre) dans les différents bassins versant.

Année	Effectif	Sélune			Sée	Couesnon
		Sélune	Beuvron	Oir		
2019	7	0	1	2	3	1
2020	12	4	0	6	2	0
2021	13	0	7	5	0	0

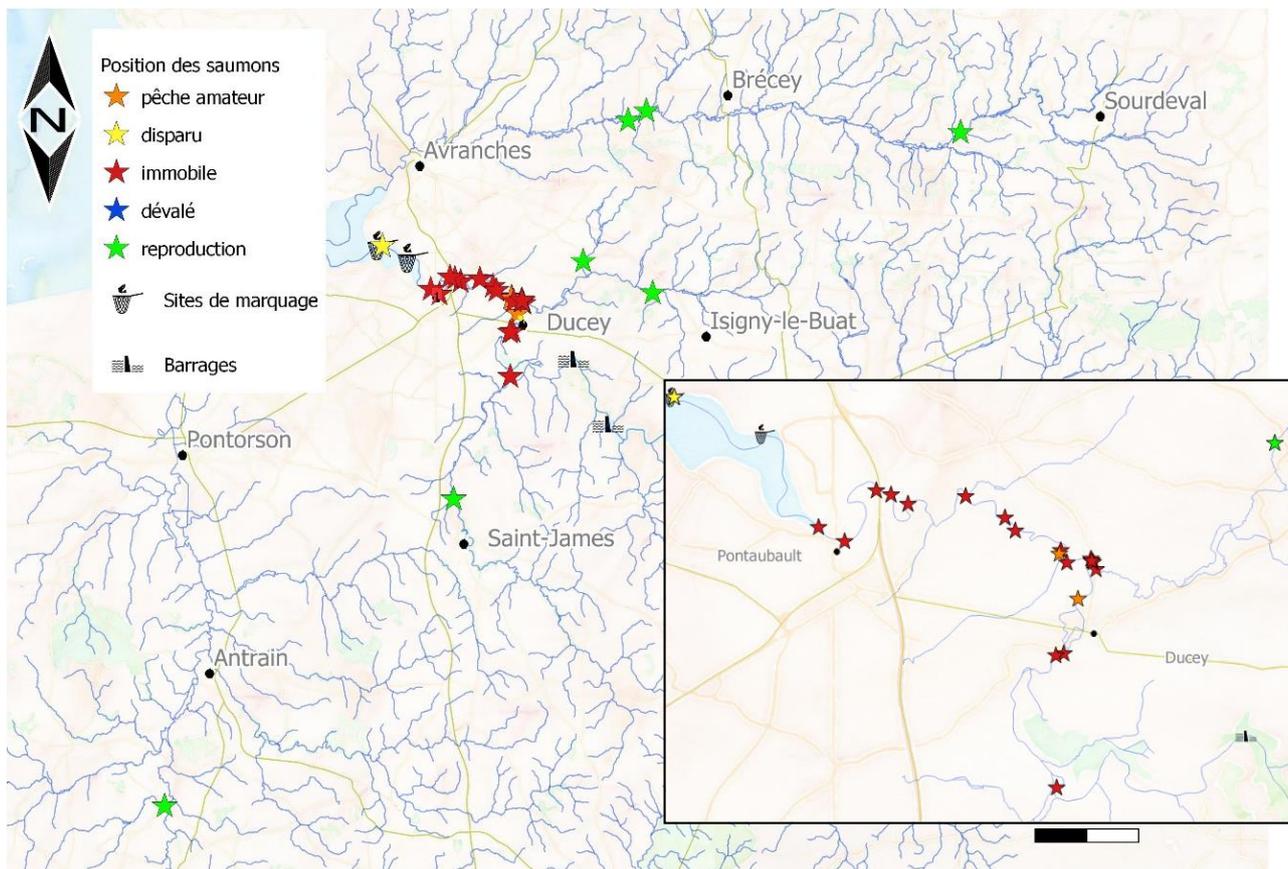


Figure 22 : Position des saumons marqués en 2019. Les positions indiquées correspondent aux localisation des dernières détections réalisées. Le devenir des individus est renseigné [mortalité par pêche amateur déclarée, disparition du système, sortie du système (dévalaison), immobilisation (mortalité probable), présence sur site de reproduction en fin d'automne].

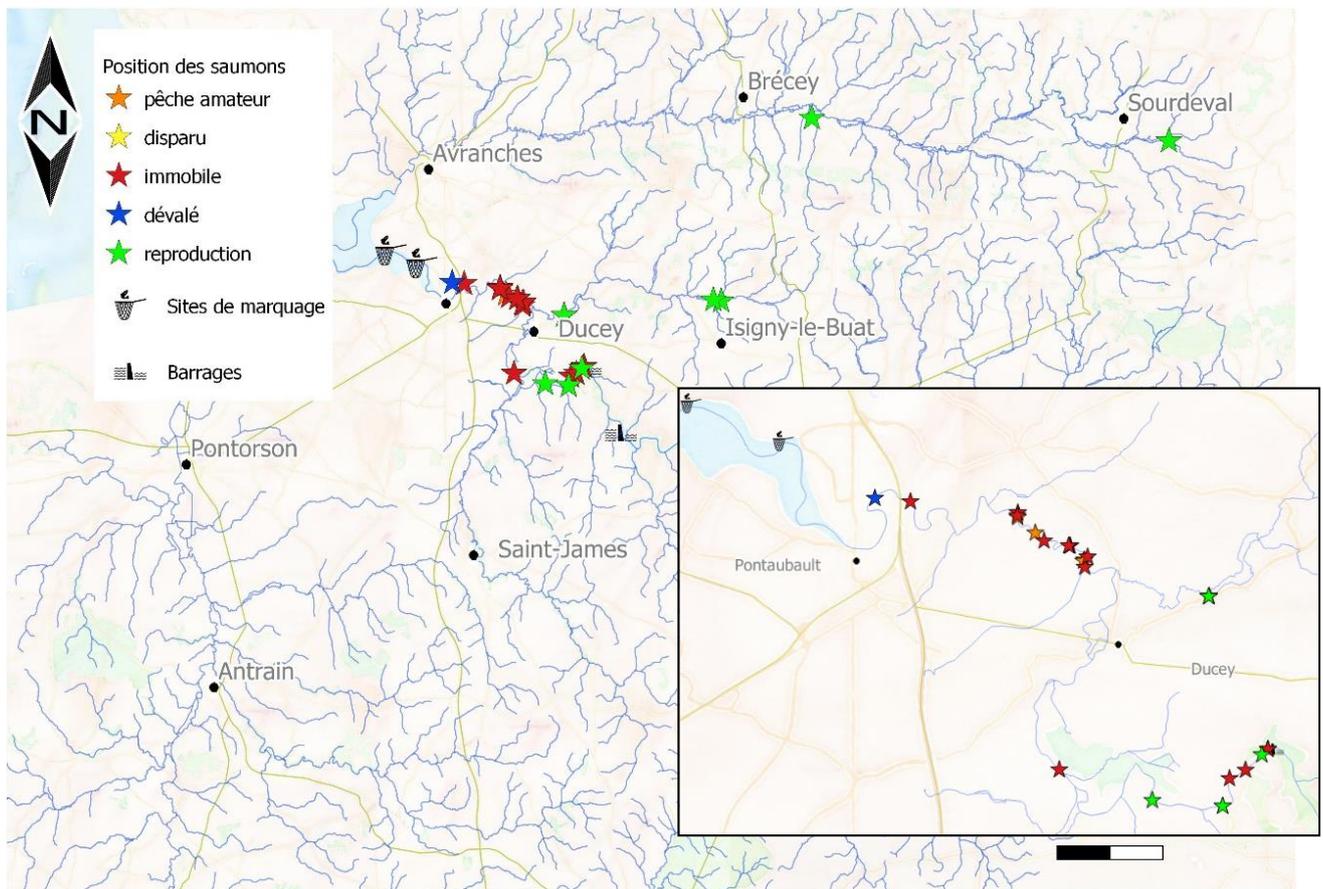


Figure 23 : Position des saumons marqués en 2020. Les positions indiquées correspondent aux localisation des dernières détections réalisées. Le devenir des individus est renseigné [mortalité par pêche amateur déclarée, disparition du système, sortie du système (dévalaison), immobilisation (mortalité probable), présence sur site de reproduction en fin d'automne].

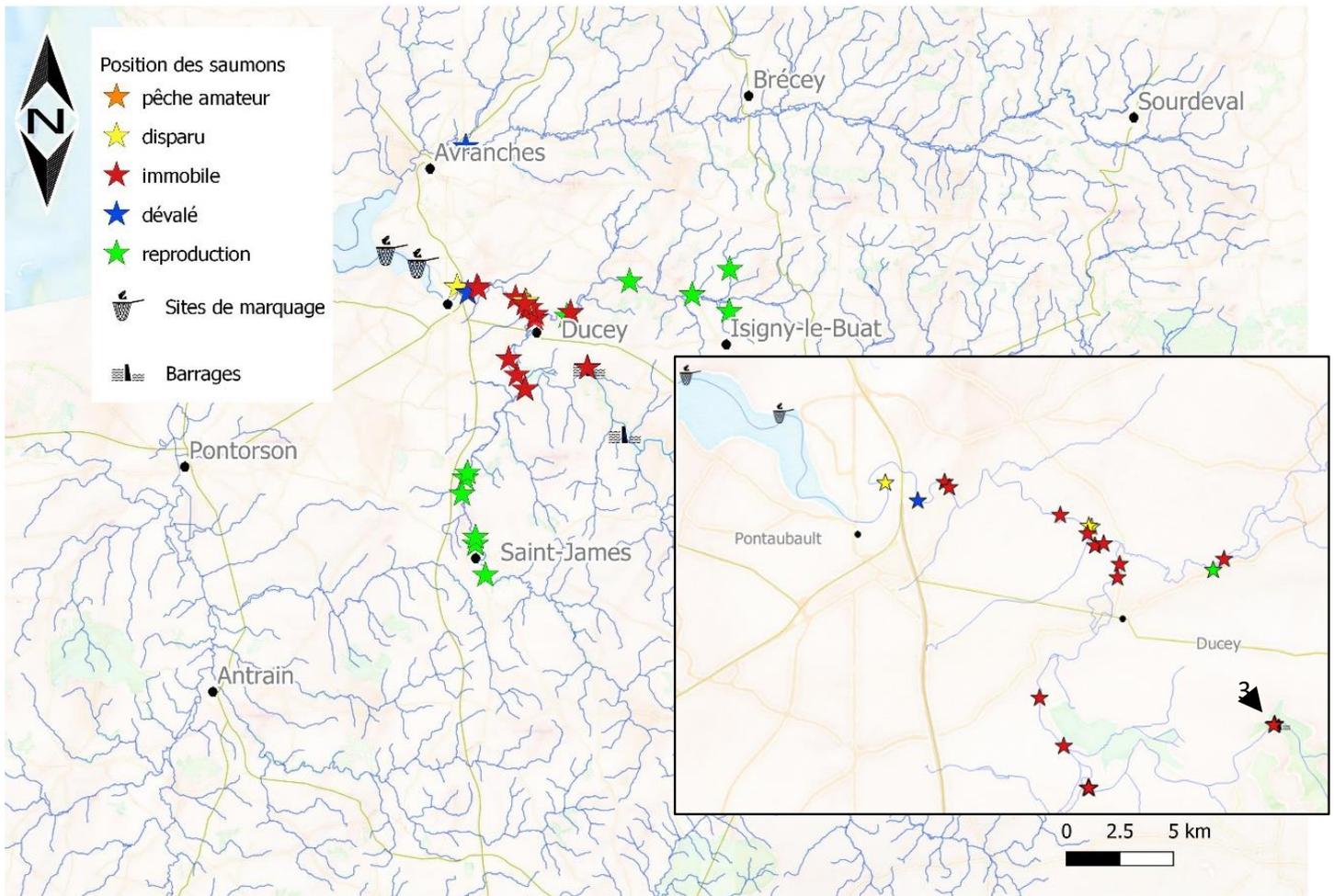


Figure 24 : Position des saumons marqués en 2021. Les positions indiquées correspondent aux localisation des dernières détections réalisées. Le devenir des individus est renseigné [mortalité par pêche amateur déclarée, disparition du système, sortie du système (dévalaison), immobilisation (mortalité probable), présence sur site de reproduction en fin d'automne].

III.2.4. Données issues du biologging

Les émetteurs de 8, 22 et 23 individus ont été récupérés en 2019 (température seulement), 2020 et 2021, respectivement. Les données enregistrées permettent d'obtenir des informations sur l'environnement des poissons (température, profondeur) et sur leur comportement (accélérométrie, changement de profondeur) qui peuvent être couplés aux données de géolocalisation issues du pistage actif ou passif. Ces données permettent aussi de préciser la date de mort apparente des individus sur la base des profils de profondeur et d'accélération. Les données issues de l'émetteur du saumon 20-070 présentées illustrent cela (Figure 25, Figure 26). Lorsque les individus sont vivants, leurs mouvements induisent de fortes variations d'accélération et de pression (ou profondeur). Les fluctuations à un rythme globalement circadien de profondeurs (tendance à remonter en dans la colonne d'eau la nuit et à rester en milieu plus profond le jour, Figure 26) cessent lorsque l'émetteur devient immobile. Les variations observées correspondent alors à des changements de pression liés aux changements de débit ou aux changements de pression atmosphérique (à partir du 20 octobre sur l'exemple présenté Figure 25). Une part importante des émetteurs étant retrouvés plusieurs semaines voire mois après la mort des individus, la possibilité de déterminer de façon fiable et rétrospective la date de mort est très intéressante, en particulier si l'on souhaite investiguer les facteurs de mortalité.

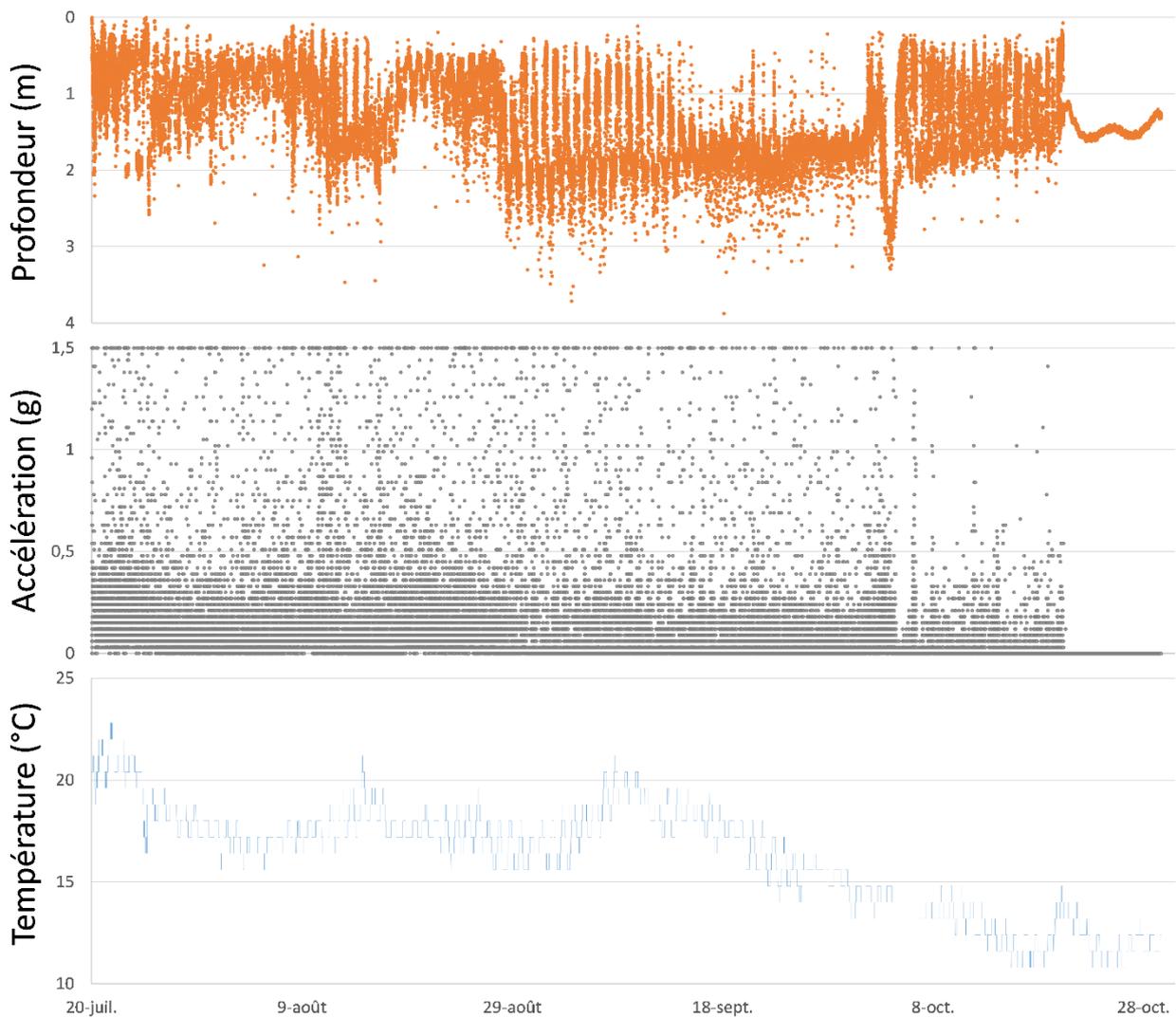


Figure 25 : Données de profondeur, d'accélération et de température issues de l'émetteur du saumon ID 21-070 suivi en 2021.

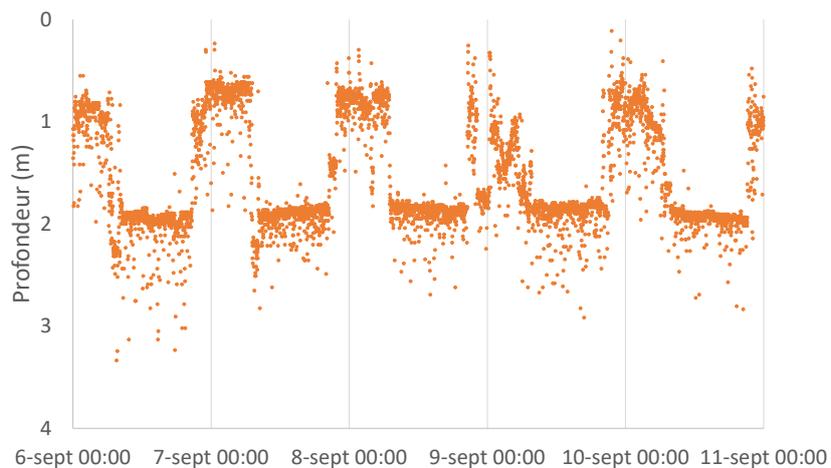


Figure 26 : Extrait de la série de donnée de profondeur enregistrées sur l'émetteur du saumon 20-070.

Profils thermiques

Les profils thermiques d'un échantillon de saumons (8 en 2019 et 10 en 2020 et 2021) révèlent que la température interne des saumons est très étroitement corrélée à la température de la Sélune, telle que mesurée au Pont de Signy (Figure 27). La température des saumons est en fait légèrement inférieure à celle de l'eau (Figure 28). La quasi-totalité (26/28) des individus présentés a passé les mois d'été dans le cours principal de la Sélune. Deux individus (saumons de printemps capturés en mai 2020 au piège de Cerisel sur l'Oir et ayant séjourné tout l'été sur la partie aval de l'Oir) ont un profil thermique différent. Les températures suivent les mêmes variations que le cours principal de la Sélune mais sont de 2 à 3°C inférieures. Les eaux de l'Oir sont en effet plus fraîches en été que celles du cours principal de la Sélune. Les saumons arrivant en début d'été ne colonisent pas l'Oir, malgré sa fraîcheur à cause des débits trop faibles qu'il présente. En revanche, les saumons utilisant le panache de l'Oir, en aval de la confluence, peuvent théoriquement bénéficier des températures localement plus fraîches (des analyses complémentaires sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse).

Ainsi, la température de la Sélune mesurée au pont de Signy pourrait être utilisée comme proxy de la température des saumons de 1 hiver de mer résidant l'été dans la partie basse du fleuve (avec une surestimation de quelques dixièmes de degrés). La différence observée s'explique par l'hétérogénéité spatiale de la Sélune qui reste néanmoins assez faible, l'échantillon de saumons suivis ne semblant utiliser d'habitats fournissant des températures nettement plus faibles comme cela peut être observé dans d'autres contextes (Frechette *et al.*, 2018). Les affluents comme l'Oir ne sont pas utilisés par les saumons de 1HM de l'échantillon suivi ici. Les augmentations de débits en d'été peuvent éventuellement favoriser ce comportement comme l'indiquent les observations réalisées à la station de comptage des poissons migrateurs de Cerisel, mais la dévalaison de ces individus est également souvent observée lors de la baisse des débits dans les jours qui suivent.

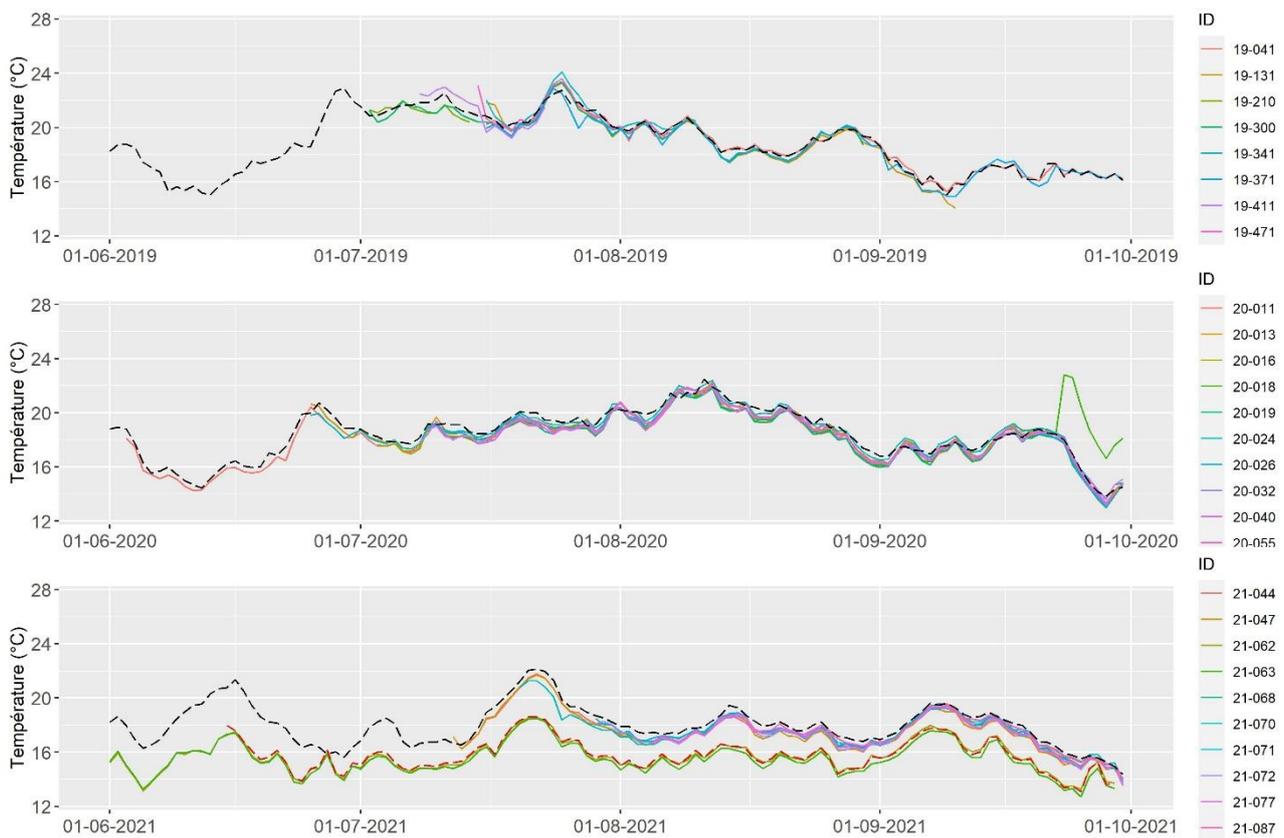


Figure 27 : Température moyenne journalière interne d'un échantillon de saumons et température moyenne journalière de la Sélune mesurée au pont de Signy au cours des trois années 2019-2021, des mois de juin à septembre (en tirés noirs ; données UMR SAS). La température journalière moyenne de l'Oir est figurée pour l'année 2021, où deux saumons de printemps ont passé les mois d'été dans l'Oir aval (tirets rouges, source : Tremblay et al., 2022)(NB : l'individu 20-018 présente une signature thermique aberrante fin septembre 2020 qui ne correspond pas à un changement d'habitat mais est a priori due à un problème de capteur, comme cela a été observé chez d'autres individus non présentés ici. Voir aussi Figure 28).

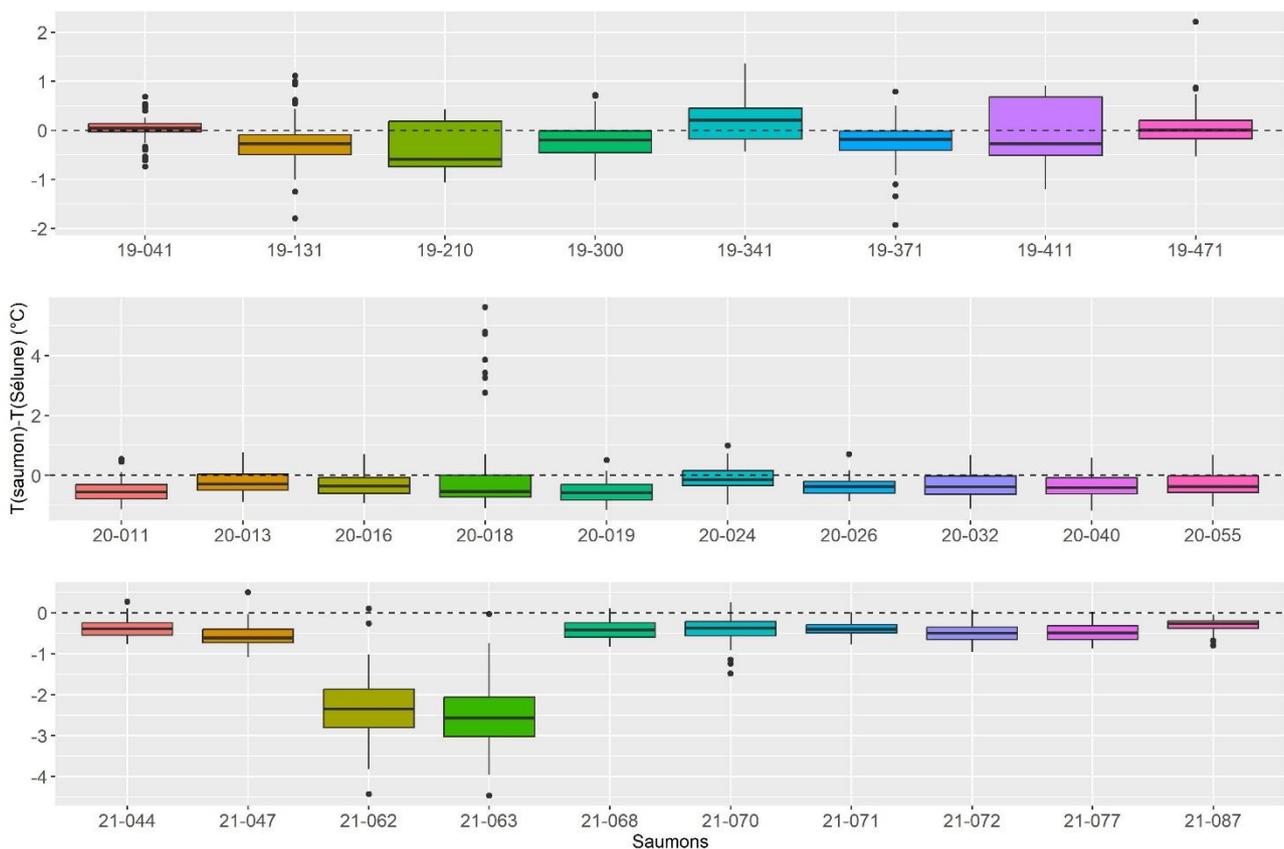


Figure 28 : Différence entre la température moyenne journalière interne d'un échantillon de saumon et la température moyenne journalière de la Sélune mesurée au pont de Signy au cours des trois années 2019-2021, des mois de juin à septembre (en pointillés noirs ; données UMR SAS).

IV. Discussion

IV.1. Contribution méthodologique

La possibilité de capturer et équiper des individus en milieu estuarien, dès leur arrivée constituait un verrou méthodologique limitant la possibilité de produire des connaissances sur la phase d'eau douce des géniteurs de saumon. Ce programme de recherche a permis de développer une méthode de capture efficace

Le principal avantage est le caractère peu invasif de la méthode, puisque les saumons sont extraits du carret très rapidement, et les blessures sont quasiment nulles (possiblement quelques pertes d'écaillés mais minimales). Le système est également mobile et non dépendant d'infrastructure lourdes. Il est envisageable de le transposer dans d'autres estuaires de caractéristiques topographiques et hydrologiques semblables. La méthode présente également certaines limites qu'il convient de souligner. Tout d'abord, elle dépend de la disponibilité d'une caméra acoustique qui est un matériel onéreux. Celles utilisées dans cette étude avaient été acquises par ailleurs. La méthode est également coûteuse en terme de main d'œuvre puisque 4 personnes au moins sont nécessaires pour travailler dans de bonnes conditions. Les périodes de mise en œuvre sont crépusculaires et nocturnes ce qui représente une contrainte et un surcoût financier. Les périodes de captures sont dépendantes des conditions hydrologiques (débit du cours d'eau et amplitude de la marée). Cela explique les difficultés à capturer les saumons de printemps qui entrent en eau douce à une époque où le débit de la rivière est en moyenne plus important. Enfin, le succès des captures dépend de la force des cohortes : les

années où les effectifs sont faibles rendent les probabilités de captures moindres et aléatoires, obligeant à renforcer l'effort de capture pour atteindre l'objectif souhaité.

Les outils radiotéléométriques utilisés, en particulier les émetteurs couplés à des biologgers, sont encore assez peu utilisés en France. Ils ont ici montré toute leur utilité et leur potentiel pour retracer les histoires individuelles et mettre en relation les activités des individus avec des paramètres environnementaux pour mieux identifier les contraintes auxquelles ils font face et comment ils y répondent.

IV.2. Contribution la problématique de la continuité dans le bassin versant de la Sélune

Les déplacements des saumons de 1HM suivis (qui constituent 95% de l'effectif) indiquent qu'une fraction faible monte jusqu'au barrage de la Roche-Qui-Boit en période estivale (ils restent cantonnés sur la partie basse de la Sélune), mais certains l'atteignent à l'automne lors de la dernière phase de migration à la recherche de zones de reproduction. Il est probable que ces individus ont été bloqués et qu'ils auraient continué de migrer plus en amont s'ils avaient pu. Cela suggère que la recolonisation des secteurs amont sera rapide. Les premières observations de saumons à l'amont de l'ancien barrage de la Roche-Qui-Boit réalisées en 2022 vont dans ce sens. Un individu a notamment été observé plusieurs dizaines de km en amont pendant la période de la reproduction. Etant donnée le très faible effectif de saumons suivi en 2022 (18), on peut très raisonnablement penser que cet individu n'est pas le seul. Des frayères, dont on ne peut affirmer avec certitude qu'elles sont bien l'œuvre de l'espèce, ont été observées sur des affluents de la partie amont de Sélune. Des prospections par pêche électrique dès l'automne prochain pourraient permettre de valider cette hypothèse.

Le saumon est connu pour la forte fidélité à son site de naissance (*homing*)(Keefer & Caudill, 2014). Néanmoins, le homing n'est pas strict à l'échelle d'une population. Il existe un continuum de comportements allant de la fidélité à la zone de frayère natale jusqu'à la dispersion dans des bassins versant parfois assez éloignés. Même si la majorité des individus montrent un fort homing, la dispersion est un élément fondamental de leur capacité à coloniser de nouveaux habitats ou des habitats dépeuplés après une perturbation comme c'est le cas lors de l'arasement d'un obstacle à la migration. Les observations mentionnées ci-dessus ne sont donc pas surprenantes.

IV.3. Contribution la problématique saumon/Thermie

Les connaissances actuelles sur les exigences thermiques du saumon et les mesures de températures réalisées dans la Sélune lors des dernières années posent clairement la problématique de l'avenir de l'espèce dans le contexte de changement climatique. Les températures élevées entraînent des surcoûts énergétiques, un stress métabolique et altèrent la capacité des adultes à se reproduire et à produire des descendants nombreux et de qualité. La combinaison de radiotéléométrie classique et de biologging s'avère intéressante pour comprendre les relations physiologie-comportement-environnement et explorer cette problématique. Le fait de travailler dans un petit système est un avantage qui permet un suivi spatio-temporel assez fin, et qui permet un accès assez facile aux individus et la récupération du matériel et des données stockées.

Les données issues des biologgers montrent que la température interne des saumons suivis dans cette étude est très proche de la température du cours d'eau où ils se trouvent. Dans certains systèmes, des zones de refuge thermique existent et permettent aux individus de limiter l'exposition à des

températures estivales trop élevées. Ces comportements de thermorégulation sont observés dans certains systèmes (Gonia *et al.*, 2006; Keefer *et al.*, 2019; O’Sullivan *et al.*, 2022).

IV.4. Appui aux politiques publiques

Seuls 23 à 38% des individus ont pu être suivis jusqu’à la période de reproduction, le reste étant mort ou a disparu précocement. Parmi les pressions existantes et pouvant expliquer ces chiffres (outre la pêche qui concerne jusqu’à 12% des individus suivis), une attention particulière doit être portée au changement climatique et à l’augmentation des températures estivales qu’il entraîne, susceptibles de compromettre la survie et le succès reproducteurs des saumons. Ainsi, les politiques publiques doivent veiller intégrer ce paramètre dans la conservation du saumon et des poissons migrateurs. D’une part, des études sont nécessaires pour mieux comprendre les effets de la température sur la physiologie des poissons et leur potentiel de réponse dans les décennies à venir, d’autre part, la gestion des habitats devrait intégrer des mesures pour mitiger les effets du changement climatique. La reconquête de la libre circulation devrait rapidement permettre aux saumons l’accès à une plus grande diversité d’habitats et à de potentiels refuges thermiques. Favoriser la ripisylve et l’ombrage dans les zones dénoyées et plus généralement sur le bassin contribuerait à réduire les pics de température comme cela a été montré dans d’autres contextes (Bowler *et al.*, 2012; Bond *et al.*, 2015; Thomas *et al.*, 2015).

Enfin, il y a suspicion de prédation par le silure au pied de l’ancien barrage de la Roche qui Boit et possiblement ailleurs. Une accumulation d’émetteurs dans un espace restreint (3 en 2020 et 3 en 2021) ne correspondant par ailleurs pas à l’habitat des saumons pose question. Aucun élément concret ne permet de valider cette hypothèse, mais un point de vigilance concernant la prédation possible du silure adulte sur les saumons (et les lamproies) est à avoir.

IV.5. Perspectives

Le suivi réalisé en 2022, année de transition qui a vu le démantèlement du barrage de la Roche-qui-Boit et la restauration de la continuité écologique entre le printemps et l’automne, et le suivi prévu pour la période 2023-2024 ont vocation à comprendre les modalités spatiales et temporelles de recolonisation des secteurs amonts ainsi que les effets sur les modalités d’utilisation de la partie aval de la Sélune. L’objectif de ce rapport focalisé sur la période pré-arasement n’était pas de présenter de façon exhaustive les données, ni de traiter l’ensemble des questions pertinentes relatives aux problématiques liées aux changements environnementaux, qu’ils soient locaux (continuité écologique) ou globaux (changement climatique), mais plutôt de dresser un panorama des possibilités offertes par les approches et outils utilisés. La quantité et la diversité des données produites par cette étude permettra de répondre à différents questionnements sur l’écologie des géniteurs de saumon atlantiques lors de leur phase en eau douce. L’un des enjeux sera de lier les différentes données comportementales (accélérométrie, mouvements horizontaux et verticaux) et environnementales (variables d’habitat, température et débit).

Au-delà de la question de la recolonisation du bassin versant, un des grands enjeux est d’évaluer la réponse des saumons réchauffement des eaux. Les résultats présentés ici confortent ceux obtenus dans d’autres contextes qui pointent du doigt la température comme facteur de mortalité ou d’altération du succès reproducteur (e.g. Crossin *et al.*, 2008; Keefer *et al.*, 2008, 2015; Baisez *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2011; Atlas *et al.*, 2021). A l’heure actuelle, les modèles de dynamique de population ignorent presque totalement la mortalité ou la baisse du succès reproducteur susceptible

de toucher les géniteurs pendant la phase d'eau douce (hors pêche) et limitent donc leur portée. Le suivi télémétrique mené ici ne permet pas d'investiguer les mécanismes impliqués dans les phénomènes observés (comportement, mortalité). Des approches écophysiologiques sont requises pour appréhender l'effet de la température sur la physiologie des saumons et évaluer les implications sur la survie, la capacité à migrer et se reproduire. Les données produites auront vocation à enrichir les modèles de dynamique de population et à identifier les leviers pour conserver les populations.

Ainsi, en 2022, des capteurs de fréquence cardiaque (STAR-ODDI® milli-HRT) ont été implantés, en plus des capteurs de température, de pression et de mouvement, dans cinq individus dans le cadre de tests de faisabilité. Ces capteurs permettent d'explorer les liens entre le rythme cardiaque, un marqueur de l'activité métabolique et du stress (Brosset et al., 2021), et de facteurs environnementaux. Les premières données obtenues issues des capteurs récupérés indiquent 1- que le protocole de marquage ne semble pas entraîner de surmortalité nette comparé au protocole de marquage intra gastrique, les cinq individus marqués par chirurgie ayant vécu 8, 30, 43, 52 et 82 jours (NB : la mortalité des saumons suivis en 2022 a été particulièrement élevée et probablement expliquée par les conditions thermiques et hydrologiques drastiques), et 2- que les données obtenues sont de bonne qualité et confirment le potentiel de cet outil pour étudier la réponse des saumons aux pressions environnementales (Figure 29). Ce protocole sera reconduit en 2023 avec un échantillon plus grand (n=15, capteurs financés par INRAE).

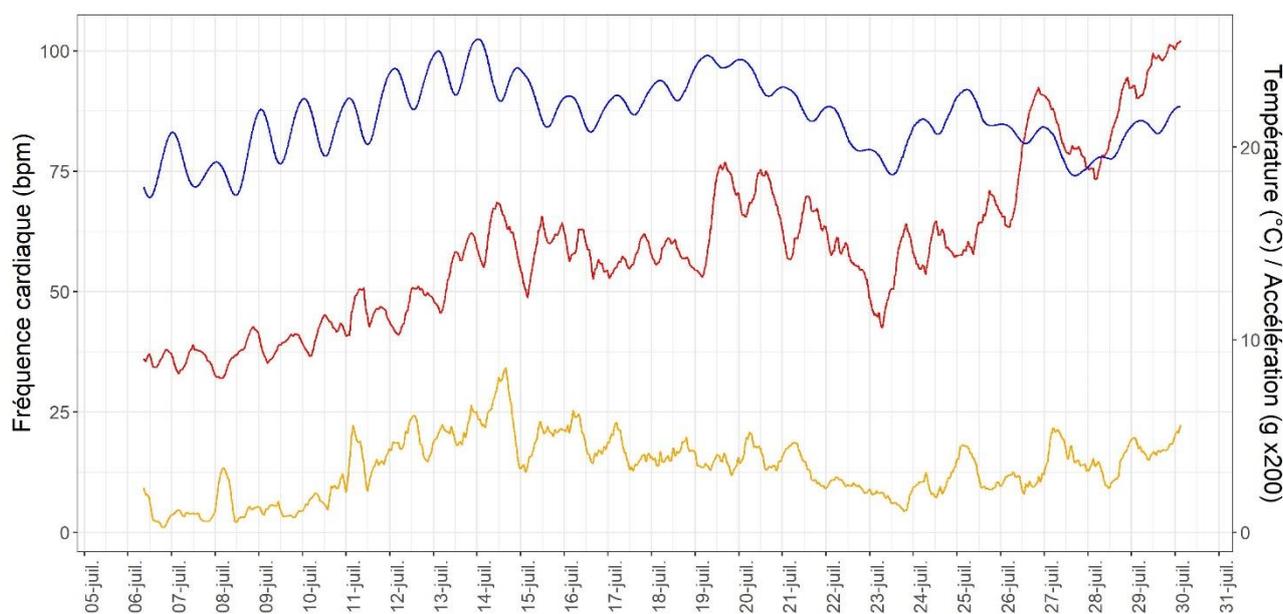


Figure 29 : Fréquence cardiaque (rouge), accélération (orange) et température corporelle (bleu) d'un saumon suivi en 2022 (moyennes mobiles). Les données de fréquences cardiaques et de température sont obtenues par un capteur STAR-ODDI® milli-HRT, et les données d'accélérométrie par l'émetteur Lotek®.

V. Références

- Aarestrup, K., Baktoft, H., Thorstad, E.B., Svendsen, J.C., Højesjö, J. & Koed, A. 2015. Survival and progression rates of anadromous brown trout kelts *Salmo trutta* during downstream migration in freshwater and at sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **535**: 185–195.
- André, G., Guillerme, N., Charles, M., Clermont-Ledez, Y., Legrand, M., Chapon, P.-M., *et al.* 2021. *Synthèse sur l'état des populations, des pressions et des modalités de gestion du Saumon Atlantique en France.*
- Atlas, W.I., Seitz, K.M., Jorgenson, J.W.N., Millard-Martin, B., Housty, W.G., Ramos-Espinoza, D., *et al.* 2021. Thermal sensitivity and flow-mediated migratory delays drive climate risk for coastal sockeye salmon. *Facets* **6**: 71–89.
- Baisez, A., Bach, J.M., Leon, C., Parouty, T., Terrade, R., Hoffmann, M., *et al.* 2011. Migration delays and mortality of adult atlantic salmon *Salmo salar* en route to spawning grounds on the River Allier, France. *Endanger. Species Res.*, doi: 10.3354/esr00384.
- Bond, R.M., Stubblefield, A.P. & Kirk, R.W. Van. 2015. Sensitivity of summer stream temperatures to climate variability and riparian reforestation strategies. *Biochem. Pharmacol.* **4**: 267–279.
- Boulêtreau, S., Gaillagot, A., Carry, L., Tétard, S., De Oliveira, E. & Santoul, F. 2018. Adult Atlantic salmon have a new freshwater predator. *PLoS One* **13**: 1–12.
- Bowler, D.E., Mant, R., Orr, H., Hannah, D.M. & Pullin, A.S. 2012. What are the effects of wooded riparian zones on stream temperature? **1**.
- Breau, C. 2013. Knowledge of fish physiology used to set water temperature thresholds for in-season closures of Atlantic salmon (*Salmo salar*) recreational fisheries. *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep* **163**: ii + 24p.
- Brosset, P., Cooke, S.J., Schull, Q., Trenkel, V.M., Soudant, P. & Lebigre, C. 2021. Physiological biomarkers and fisheries management. *Rev. Fish Biol. Fish.* **31**: 797–819. Springer International Publishing.
- Chmura, H.E., Glass, T.W. & Williams, C.T. 2018. Biologging Physiological and Ecological Responses to Climatic Variation: New Tools for the Climate Change Era. *Front. Ecol. Evol.* **6**: 1–9.
- Cooke, S.J., Midwood, J.D., Thiem, J.D., Klimley, P., Lucas, M.C., Thorstad, E.B., *et al.* 2013. Tracking animals in freshwater with electronic tags: Past, present and future.
- Crossin, G.T., Hinch, S.G., Cooke, S.J., Welch, D.W., Patterson, D.A., Jones, S.R.M., *et al.* 2008. Exposure to high temperature influences the behaviour, physiology, and survival of sockeye salmon during spawning migration. *Can. J. Zool.* **86**: 127–140.
- Croze, O. 2005. Radio-tracking: a useful tool for the Aulne Atlantic salmon rehabilitation program. *Aquat. Telem. Adv. Appl. Proc. Fifth Conf. Fish Telem. held Eur. Ustica, Italy, 9-13 June 2003.* 13–24.
- Dahlke, F.T., Wohlrab, S., Butzin, M. & Pörtner, H.O. 2020. Thermal bottlenecks in the life cycle define climate vulnerability of fish. *Science* **369**: 65–70.
- Douillard, E. & Judic, J. 2014. *Etude liée aux procédures d'autorisation du démantèlement des barrages de Vezins et la Roche Qui Boit – Dossier de demande de dérogation au titre des articles L.411-2 et R.411-6 A 14 du Code de l'Environnement.* Département de la Manche.
- Duda, J.J., Torgersen, C.E., Brenkman, S.J., Peters, R.J., Sutton, K.T., Connor, H.A., *et al.* 2021. Reconnecting the Elwha River: Spatial Patterns of Fish Response to Dam Removal. *Front. Ecol. Evol.* **9**.
- Eliason, E.J., Clark, T.D., Hague, M.J., Hanson, L.M., Gallagher, Z.S., Jeffries, K.M., *et al.* 2011. Differences in thermal tolerance among sockeye salmon populations. *Science (80-)*. **332**: 109–

- Fenkes, M., Shiels, H.A., Fitzpatrick, J.L. & Nudds, R.L. 2016. The potential impacts of migratory difficulty, including warmer waters and altered flow conditions, on the reproductive success of salmonid fishes. *Comp. Biochem. Physiol. -Part A Mol. Integr. Physiol.*, doi: 10.1016/j.cbpa.2015.11.012.
- Forget, G., Baglinière, J.-L., Marchand, F., Richard, A. & Nevoux, M. 2018. A new method to estimate habitat potential for Atlantic salmon (*Salmo salar*): predicting the influence of dam removal on the Sélune River (France) as a case study. *ICES J. Mar. Sci.*, doi: 10.1093/icesjms/fsy089.
- Frechette, D.M., Dugdale, S.J., Dodson, J.J. & Bergeron, N.E. 2018. Understanding summertime thermal refuge use by adult Atlantic salmon using remote sensing, river temperature monitoring, and acoustic telemetry. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1–12.
- Gerber, L., Clow, K.A., Mark, F.C. & Gamperl, A.K. 2020. Improved mitochondrial function in salmon (*Salmo salar*) following high temperature acclimation suggests that there are cracks in the proverbial 'ceiling.' *Sci. Rep.* **10**: 1–12. Nature Publishing Group UK.
- Gerlier, M. & Roche, P. 1998. A radio telemetry study of the migration of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and sea trout (*Salmo trutta trutta* L.) in the upper Rhine. *Hydrobiologia* **371–372**: 283–293.
- Goniaea, T.M., Keefer, M.L., Bjornn, T.C., Peery, C.A., Bennett, D.H. & Stuehrenberg, L.C. 2006. Behavioral Thermoregulation and Slowed Migration by Adult Fall Chinook Salmon in Response to High Columbia River Water Temperatures. *Trans. Am. Fish. Soc.* **135**: 408–419.
- Gradil, K.J., Garner, S.R., Wilson, C.C., Farrell, A.P. & Neff, B.D. 2016. Relationship between cardiac performance and environment across populations of Atlantic salmon (*Salmo salar*): a common garden experiment implicates local adaptation. *Evol. Ecol.* **30**: 877–886. Springer International Publishing.
- Keefer, M.L. & Caudill, C.C. 2014. Homing and straying by anadromous salmonids: A review of mechanisms and rates. *Rev. Fish Biol. Fish.* **24**: 333–368.
- Keefer, M.L., Clabough, T.S., Jepson, M.A., Bowerman, T. & Caudill, C.C. 2019. Temperature and depth profiles of Chinook salmon and the energetic costs of their long-distance homing migrations. *J. Therm. Biol.* **79**: 155–165. Elsevier Ltd.
- Keefer, M.L., Clabough, T.S., Jepson, M.A., Naughton, G.P., Blubaugh, T.J., Joosten, D.C., *et al.* 2015. Thermal exposure of adult Chinook salmon in the Willamette river basin. *J. Therm. Biol.* **48**: 11–20. Elsevier.
- Keefer, M.L., Peery, C.A. & Heinrich, M.J. 2008. Temperature-mediated en route migration mortality and travel rates of endangered Snake River sockeye salmon. *Ecol. Freshw. Fish* **17**: 136–145.
- Keefer, M.L., Peery, C.A., Ringe, R.R. & Bjornn, T.C. 2004. Regurgitation Rates of Intragastric Radio Transmitters by Adult Chinook Salmon and Steelhead during Upstream Migration in the Columbia and Snake Rivers. *North Am. J. Fish. Manag.* **24**: 47–54.
- Kennedy, R.J., Allen, M. & Wilson, R. 2018. Tag retention and mortality of adult Atlantic salmon *Salmo salar* gastrically tagged with different sized telemetry transmitters. *J. Fish Biol. Anim. Sci. Proced. Act (U.K)* **92**: 2016–2021.
- King, H.R., Pankhurst, N.W. & Watts, M. 2007. Reproductive sensitivity to elevated water temperatures in female Atlantic salmon is heightened at certain stages of vitellogenesis. *J. Fish Biol.* **70**: 190–205.
- Lasne, E., Chaubet, T., Martignac, F. & Tremblay, J. 2020. *Déplacements et utilisation des habitats par les poissons migrants sur la Sélune*. Rapport d'étape_V0. [Rapport de recherche]. OFB; INRAE; Institut Agro - Agrocampus Ouest; UPPA.

- Le Gonidec, C., Grimaldi, C., Fovet, O. & Vergnaud, V. 2016. *Dynamique fluviale Volet 1 Flux hydriques, sédimentaires et chimiques, Programme Sélune - Phase « Travaux d'arasement » Rapport bilan 2019-2021.*
- Lennox, R.J., Aarestrup, K., Cooke, S.J., Cowley, P.D., Deng, Z.D., Fisk, A.T., *et al.* 2017. Envisioning the Future of Aquatic Animal Tracking: Technology, Science, and Application. *Bioscience* **67**: 884–896.
- Lennox, R.J., Chapman, J.M., Twardek, W.M., Broell, F., Bøe, K., Whoriskey, F.G., *et al.* 2019. Biologging in combination with biotelemetry reveals behavior of Atlantic salmon following exposure to capture and handling stressors. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **8**: 1–8.
- Lennox, R.J., Eliason, E.J., Havn, T.B., Johansen, M.R., Thorstad, E.B., Cooke, S.J., *et al.* 2018. Bioenergetic consequences of warming rivers to adult Atlantic salmon *Salmo salar* during their spawning migration. *Freshw. Biol.* **63**: 1381–1393.
- Martignac, F., Daroux, A., Bagliniere, J.L., Ombredane, D. & Guillard, J. 2015. The use of acoustic cameras in shallow waters: New hydroacoustic tools for monitoring migratory fish population. A review of DIDSON technology. *Fish Fish.* **16**: 486–510.
- Martins, E.G., Hinch, S.G., Patterson, D.A., Hague, M.J., Cooke, S.J., Miller, K.M., *et al.* 2011. Effects of river temperature and climate warming on stock-specific survival of adult migrating Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Glob. Chang. Biol.* **17**: 99–114.
- Milner, N.J., Solomon, D.J. & Smith, G.W. 2012. The role of river flow in the migration of adult Atlantic salmon, *Salmo salar*, through estuaries and rivers. *Fish. Manag. Ecol.* **19**: 537–547.
- O'Sullivan, A.M., Linnansaari, T., Leavitt, J., Samways, K.M., Kurylyk, B.L. & Curry, R.A. 2022. The salmon-peloton: Hydraulic habitat shifts of adult Atlantic salmon (*Salmo salar*) due to behavioural thermoregulation. *River Res. Appl.* **38**: 107–118.
- Pahl, R. 2017. Methodology for Developing Summer Thermal Tolerance Thresholds for Various Juvenile and Adult Fish in Nevada. 1–20.
- Perrier, C., Guyomard, R., Bagliniere, J.L. & Evanno, G. 2011. Determinants of hierarchical genetic structure in Atlantic salmon populations: Environmental factors vs. anthropogenic influences. *Mol. Ecol.* **20**: 4231–4245.
- Pess, G.R., Quinn, T.P., Gephard, S.R. & Saunders, R. 2014. Re-colonization of Atlantic and Pacific rivers by anadromous fishes: Linkages between life history and the benefits of barrier removal. *Rev. Fish Biol. Fish.* **24**: 881–900.
- Quéméré, E., Perrier, C., Besnard, A.L., Evanno, G., Baglinière, J.L., Guiguen, Y., *et al.* 2014. An improved PCR-based method for faster sex determination in brown trout (*Salmo trutta*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Conserv. Genet. Resour.* **6**: 825–827.
- Ramstad, K. & Woody, C. 2003. Radio Tag Retention and Tag-Related Mortality among Adult Sockeye Salmon. *North Am. J. Fish. Manag.* **23**: 978–982.
- Smith, G.W., Campbell, R.N.B. & Maclaine, J.S. 1998. Regurgitation rates of intragastric transmitters by adult Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) during riverine migration. 117–121.
- Thomas, O. 2015. *Sur la présence du saumon (et d'autres poissons) dans la Sélune avant la construction du barrage de la Roche-Qui-Boit.* ANR REPPAVAL. <https://selune.hypotheses.org/650>.
- Thomas, S.M., Griffiths, S.W. & Ormerod, S.J. 2015. Adapting streams for climate change using riparian broadleaf trees and its consequences for stream salmonids. *Freshw. Biol.* **60**: 64–77.
- Tremblay, J., Delanoë, R., Destouches, J.-P. & Marchand, F. 2022. Water temperature on the Oir river and its tributaries (Manche county - France). Recherche Data Gouv.
- Wilkie, M.P., Brobbel, M.A., Davidson, K.G., Forsyth, L. & Tufts, B.L. 1997. Influences of temperature

upon the postexercise physiology of Atlantic salmon(*Salmo salar*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **54**: 503–511.

Wismer, D. a & Christie, A.E. 1987. Temperature Relationships of Great Lakes Fishes: a data compilation. *Gt. Lakes Fish. Comm. Spec. Publ.* **87**: 165.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Avec le soutien financier de :



www.afbiodiversite.fr



la science pour la vie, l'humain, la terre

<http://www.inrae.fr/>



<https://www.institut-agro-rennes-angers.fr/>



www.univ-pau.fr

