

**CRESCO-MNHN**  
38, rue du port blanc  
35800 Dinard  
Tél : 02 23 18 58 82



*Rapport phase 1*

PLAN  
LOIRE  
GRANDEUR NATURE

**EVALUATION DU STOCK DE SAUMONS  
ENTRANT EN ESTUAIRE DE LA LOIRE ET  
ETUDE DU COMPORTEMENT MIGRATOIRE  
JUSQU'AUX SECTEURS AMONT PHASE 1**

Stéphane Tétard, Emilien Lasne, Romain Gadais, Elise Bultel, Eric Feunteun  
Muséum National d'Histoire Naturelle, CRESCO, Dinard  
*En association avec l'INRA, UMR ESE, Rennes*



## TABLE DES MATIERES

<b>I. Introduction : contexte et enjeux .....</b>	<b>4</b>
A. Les espèces diadromes : problématique de conservation .....	4
B. Cas de la population de Saumon de Loire-Allier .....	4
C. La migration estuarienne : une étape importante sous pression anthropique, mais méconnue ..	5
D. Cadre réglementaire pour la gestion du Saumon en France.....	6
E. Objectifs et présentation de l'étude .....	7
<b>II. Synthèse bibliographique des connaissances biologiques et méthodologiques disponibles .....</b>	<b>8</b>
A. Capture des géniteurs de Saumons en estuaire .....	8
Matériel de capture .....	8
Protocole de capture .....	9
B. Suivi individuel de la migration estuarienne.....	9
Techniques de suivi (marque active vs passive, radio vs acoustique, suivi actif vs passif).....	9
Stabulation, anesthésie, marquage, relâcher,...	11
C. Migration des Saumons et facteurs environnementaux .....	11
Mouvements horizontaux .....	11
Mouvements verticaux.....	13
Vitesses.....	13
Rythmes circadiens .....	13
Comportement grégaire des Saumons en estuaire .....	14
Vents.....	14
Débit .....	14
Oxygène dissous .....	15
Température.....	15
<b>III. Bilan de la première campagne de pêche « Evaluation du stock de Saumons entrant dans l'estuaire de la Loire et étude du comportement migratoire jusqu'aux secteurs amont ».....</b>	<b>16</b>
A. Matériel et méthode.....	16
L'estuaire de la Loire.....	16
Données environnementales disponibles dans l'estuaire de la Loire .....	18
Captures .....	18
Principe de la télémétrie acoustique et matériel utilisé.....	20
Marquage et relâche des poissons .....	22
Collecte des données de détection .....	22
B. Résultats .....	23
Caractéristiques des individus capturés .....	23
Détection et porosité acoustiques .....	24
Comportement des Saumons .....	24
<b>IV. Discussion et perspectives pour la phase 2 .....</b>	<b>27</b>
A. Capture des Saumons .....	27
Zone de pêche .....	27
Coefficients de marée.....	27
Effort de pêche .....	27
B. Marquage.....	28
C. Comportement des Saumons .....	28
D. Réseau acoustique.....	28
<b>V. Bibliographie .....</b>	<b>30</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution des effectifs de Saumons atlantiques observés à la station de ..... 5 comptage de Vichy depuis 1997 (Source : LOGRAMI) .....	5
Figure 2 : Réseau d'hydrophones en place en Loire en 2012. 34 hydrophones sont répartis sur 8 sites. Les sites marqués d'un astérisque comportent .....	17
au moins une station de mesure du réseau SYVEL. ....	17
Figure 3 : Principe de capture des poissons par le filet trémail (source IFREMER) .....	19
Figure 4 : Zone de pêche à marée haute (PM) et à marée basse (BM) positionnée sur une coupe transversale Nord-Sud de la Loire au niveau de Cordemais. ....	19
Figure 5: Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques.....	20
Figure 6 : Système d'installation principal des hydrophones sur les bouées et balises de navigation.	21
Figure 7 : Zone de prélèvement d'écaillés sur un Saumon atlantique adulte pêché le 20 mars 2012 matérialisée par le rectangle vert. La zone d'implantation du tag TIRIS est matérialisée en bleue.....	22
Figure 8 : Photo de la tête d'un individu capturé en estuaire de Loire,.....	23
quelques marques de filet sont visibles. ....	23
Figure 9 : Evolution des détections des 3 Saumons marqués (respectivement SASA-1000, SASA-1001 et SASA-1002) en estuaire de Loire. Les lignes en pointillés représentent les différentes zones où sont présents les hydrophones. ....	24
Figure 10 : Emplacement des hydrophones à Saint Nazaire. Les cercles en pointillés indiquent les rayons de détection maximaux des hydrophones. Les flèches rouges indiquent d'éventuels trajets non détectables des Saumons.....	25
Figure 11 : Evolutions des détections de SASA-1000 et de la hauteur d'eau à Paimboeuf dans le temps.....	26
Figure 12 : Bilan de la campagne de pêche 2012 et perspectives d'amélioration pour la fin du projet et le début de la seconde phase.....	29

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques générales des trois Saumons capturés au printemps 2012.....	23
Tableau 2 : Détections consécutives de Saumons temporellement espacées à l'embouchure de la Loire.....	25

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Réseau d'hydrophones opérationnel en Loire en 2012 .....	34
Annexe 2 : Action de pêche au filet dérivant en estuaire de Loire aval.....	35
Annexe 3 : Marques et récepteur utilisés .....	36
Annexe 4 : Photos illustrant le protocole de marquage des Saumons .....	37
Annexe 5 : Comportement des poissons marqués (SASA-1001 et SASA-1002) en lien avec le cycle tidal estuarien.....	38

# I. Introduction : contexte et enjeux

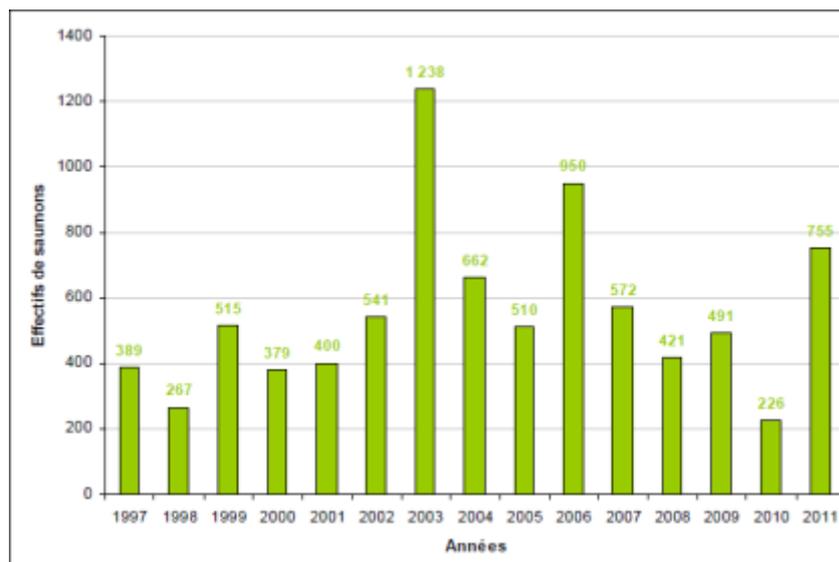
## A. Les espèces diadromes : problématique de conservation

Les poissons diadromes comme le Saumon atlantique (*Salmo salar* Linnaeus, 1758) sont des espèces qui effectuent une partie de leur cycle biologique en mer et une autre en rivière. Cette particularité les rend très sensibles aux nombreuses pressions rencontrées dans l'un ou l'autre des milieux et lors des migrations. A l'heure actuelle, ces espèces sont souvent considérées comme menacées, ou vulnérables, en deçà de leur limites biologiques de sécurité, avec pour certaines, un déclin avéré ou annoncé dans plusieurs zones géographiques (Lassalle, 2008 ; Limburg et Waldman, 2009). Les causes en jeu sont diverses: réchauffement climatique, rupture de la connectivité entre habitats essentiels, pollution, sur-exploitation, ...etc. (Lasne et al., 2011). La gestion de ces espèces diadromes est très délicate de part la nécessité de répondre à ces multiples pressions qu'elles subissent à différentes étapes de leur cycle de vie. Il s'agit donc souvent de restaurer à la fois les habitats de reproduction ou de croissance en rivière et la connectivité entre ces habitats. Ceci implique de bien connaître les cycles de vie, les habitats essentiels et leur fonctionnalité. Or, si pour la plupart des espèces, les phases d'eau douce de croissance (pour l'anguille) ou de reproduction (pour les anadromes) sont assez bien connues, les étapes marines ainsi que les migrations en estuaire et dans les grands cours d'eau sont moins accessibles et donc moins documentées.

Le Saumon atlantique se situe exactement dans ce cas de figure : les connaissances des phases de reproduction et les premiers stades sont disproportionnellement grandes par rapport aux connaissances des phases estuariennes et marines. Les phases de migration à l'aval des fleuves sont aussi mal connues. La reproduction du Saumon a lieu en eau douce à partir du mois de Novembre, sur les têtes de bassin versants. Après quelques mois d'incubation (de 3 à 5 mois) puis environ un mois sous les graviers, les juvéniles de Saumons, appelés tacons, commencent à se nourrir et colonisent les rivières. Ils passent une ou deux années en rivière, puis subissent des modifications physiques et physiologiques qui les préparent à la vie marine lors d'un processus appelé "*smoltification*". Les smolts, rassemblés en bancs, descendent alors les cours d'eau puis rejoignent alors les aires de grossissement marines, situées au large du Groenland et des îles Féroé. Le séjour en mer dure d'une à trois années (plus rarement quatre), puis les Saumons reviennent vers les eaux continentales dont ils sont originaires (phénomène de *homing*) pour se reproduire. Les premiers Saumons de Loire arrivent en estuaire dès l'automne soit environ 1 an avant leur reproduction. Les remontées de Saumons s'arrêtent souvent pendant les périodes les plus froides et reprennent en Février-Mars jusqu'en Juin. Durant la remontée des cours d'eau, les adultes, ayant cessé de se nourrir, puisent dans les réserves énergétiques accumulées pendant la phase marine. Généralement, ils ne survivent pas à la reproduction, cependant une faible proportion d'individus peut résister et reprendre une nouvelle migration vers la mer.

## B. Cas de la population de Saumon de Loire-Allier

Le Saumon atlantique (*Salmo salar* Linnaeus, 1758) est un poisson très emblématique du bassin de la Loire. Historiquement présent en très grand nombre sur le bassin (on estime que chaque année plus de 100 000 Saumons se présentaient en estuaire au début du 18ème siècle), il est aujourd'hui hautement menacé (Figure 1) (Valadou, 2008). Le graphique présentant l'évolution des effectifs de Saumons sur l'Allier à Vichy depuis 1997 montre des passages de Saumons extrêmement faibles et surtout très aléatoires. Bien entendu il s'agit de Saumons se présentant à Vichy et non pas en estuaire (cf. §E. Objectifs et présentation de l'étude). Toutefois il est clair qu'un nombre très faible de géniteurs arrive sur les zones amont de la Loire (le bassin de l'Allier concentre 86,4 % du contingent total du bassin de la Loire (Rapport d'activités LOGRAMI, 2011)).



**Figure 1 : Evolution des effectifs de Saumons atlantiques observés à la station de comptage de Vichy depuis 1997 (Source : LOGRAMI)**

La migration du Saumon de l'Allier est remarquable : c'est le seul Saumon, à l'échelle de l'Europe, encore capable d'effectuer de très grandes migrations (environ 10 000 kms dont près de 1000 en rivière). Cette propriété de leur migration en fait une population très originale vraisemblablement adaptée à la configuration géographique de la migration : les premières zones de fraie encore fonctionnelles sont éloignées de 800 km de la mer.

Ce long parcours en eau douce explique probablement que la population soit majoritairement composée de grands Saumons de 2 à 3 ans de mer, la part de castillons (1 an de mer) étant quasiment inexistante contrairement à ce que l'on peut observer sur d'autres bassins versants. De grands et gros individus ont en effet davantage de chances d'achever leur migration.

La phénologie de la migration est également remarquable : comme il est évoqué plus haut, les premiers grands Saumons arrivent en estuaire de Loire à l'automne, soit près d'un an avant leur reproduction. Encore une fois, ceci peut être une adaptation aux changements hydrologiques de la Loire, des poissons arrivant tôt ont davantage de chances d'avoir des niveaux d'eaux suffisants pour franchir les différents obstacles à leur remontée.

### ***C. La migration estuarienne : une étape importante sous pression anthropique, mais méconnue***

La migration estuarienne est un passage obligé pour le Saumon à la fois à la montaison et à la dévalaison. A la montaison, le Saumon reconnaît les molécules caractérisant sa rivière natale (« homing ») et décide de s'y engager. L'estuaire de Loire est une des zones les plus critiques du bassin en termes de pollution. Elle concentre les apports du bassin en plus de la forte activité industrielle et urbaine présente entre Saint-Nazaire et Nantes. Cette zone de rencontre entre eaux douces et eaux salées conjuguée à des concentrations de matières en suspension importantes provoque le phénomène de bouchon vaseux. Cela peut devenir un obstacle infranchissable pour les migrateurs : les conditions d'oxygénation peuvent y devenir intolérables. C'est un phénomène naturel et mobile mais son accentuation depuis de nombreuses années (en lien avec les modifications hydromorphologiques de la Loire : surcreusement du chenal, abaissement généralisé de la ligne d'eau) pose le problème de son impact sur les populations de migrateurs. La qualité des eaux estuariennes s'améliore depuis le début des années 2000 mais les crises d'anoxie dans

l'estuaire se produisent toujours et on soupçonne un impact important de ce phénomène lorsqu'il coïncide avec les fenêtres de migration du Saumon mais également d'autres espèces (Aloses feintes, grandes Aloses, lamproies). Les situations d'étiage de plus en plus fréquentes en Loire, provoquent la formation du bouchon vaseux de plus en plus tôt et de plus en plus en amont. Cela pourrait réduire encore davantage les fenêtres propices aux amphihalins pour accomplir leur migration estuarienne. Aucune études n'ont pour le moment montré l'impact direct du bouchon vaseux sur les espèces amphihalines.

De plus, la pêche pourrait également impacter le Saumon. En effet, même si la pêche du Saumon est interdite depuis 1994 dans tout le bassin de la Loire, l'exploitation d'autres espèces comme la Lamproie marine ou les Aloses met en œuvre des métiers peu sélectifs (filet tramail dérivant) qui peuvent théoriquement capturer des Saumons qui doivent alors être remis à l'eau par les pêcheurs. Ainsi des Saumons présentant des marques de filets peuvent être observés au niveau des passes à poissons à l'amont, l'impact réel restant inconnu.

#### ***D. Cadre réglementaire pour la gestion du Saumon en France***

Le plan de gestion des poissons migrateurs (PLAGEPOMI) 2009-2013 pour le bassin de la Loire intervient dans un cadre réglementaire qui ne cesse d'évoluer depuis quelques années. Ainsi la Directive Cadre sur l'eau (DCE) du 22 décembre 2000 fixe des objectifs ambitieux pour la préservation et la restauration de l'état des eaux. Chaque état doit appliquer une série de mesures visant à garantir le bon état écologique et chimique des eaux d'ici l'horizon 2015 et notamment garantir la continuité écologique des cours d'eaux, partie intégrante du bon état écologique des eaux. La Loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 23 décembre 2006 crée de nouveaux outils pour atteindre les objectifs fixés par la DCE et notamment concernant les migrateurs : réforme du classement des cours d'eaux pour mieux prendre en compte la notion de continuité écologique, dispositions pénales relatives à la protection des espèces...

Plus spécifiquement concernant le Saumon, un plan français de mise en œuvre des recommandations de l'OCSAN (Organisation de Conservation du Saumon de l'Atlantique Nord) en matière de protection, de gestion et de mise en valeur du Saumon atlantique et de son habitat a été validé en 2008. Certaines de ces actions recommandées par l'OCSAN concernent directement la Loire et ont donc été intégrées dans le PLAGEPOMI 2009-2013.

A l'échelle du bassin versant le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) définit les mesures visant à la protection des milieux aquatiques et à la protection du patrimoine piscicole. Le SDAGE Loire Bretagne 2010-2015 comporte 15 mesures dont une est spécifiquement consacrée aux migrateurs comme le Saumon.

Le troisième plan Loire Grandeur Nature dans lequel s'inscrit ce projet, comprend un volet relatif à la restauration de la diversité écologique du milieu en s'attachant spécifiquement à la préservation des poissons migrateurs. C'est l'outil majeur de mise en œuvre dans le bassin de la Loire de toutes les dispositions présentes dans les différents cadres réglementaires (DCE, LEMA, SDAGE).

## ***E. Objectifs et présentation de l'étude***

Les objectifs de ce projet étaient de répondre aux mesures 49 et 50 du Plan Saumon Loire-Allier 2009-2013 :

- *Mesure 49* : évaluer l'état du stock de Saumon entrant dans le bassin de la Loire par la mise en place d'une étude destinée à identifier le nombre de Saumons adultes entrant dans l'estuaire et leur état sanitaire.
- *Mesure 50* : mettre en place un suivi des migrations de Saumons adultes sur l'ensemble de l'axe Loire-Allier pour identifier les zones à problème et préciser les causes des pertes en ligne (pit-tags, radiopistage).

L'évaluation du stock de Saumon entrant est réalisée par une méthode de marquage-recapture indirecte. Les Saumons seront pêchés en estuaire à l'aide d'un filet dérivant et seront équipés d'une marque passive de modèle TIRIS. Cette marque permet de détecter le Saumon s'il passe au niveau de stations de comptage équipées d'un cadre de réception et gérées par l'association LOGRAMI (les principaux axes de migration en sont pourvus). Ainsi, par une méthode de calcul indirecte (sous réserve d'un nombre d'individus capturés suffisant), il sera possible d'obtenir une estimation du nombre de Saumons entrant dans l'estuaire (mesure 49). Le recours aux tags acoustiques permis par l'utilisation du réseau d'hydrophones du MNHN existant permettra quant à lui de répondre à la mesure 50 du PLAGEPOMI. Il permettra d'étudier le comportement migratoire des Saumons sur l'ensemble de l'estuaire de la Loire et de potentiellement détecter des zones à problème.

En particulier, cette première année de suivi en estuaire aval avait pour but de vérifier la capacité de capture des Saumons mais également la capacité de marquage et de suivi par télémétrie acoustique jusqu'aux zones amonts de l'estuaire. En outre, ce projet se fera en étroite collaboration avec l'INRA de Rennes (prélèvement d'échantillons de nageoires pour contribuer au projet sur la génétique des Saumons de Loire) qui serait susceptible de le poursuivre sur plusieurs années. La poursuite du projet visera à véritablement répondre aux mesures du PLAGEPOMI, notamment en effectuant des recaptures et de nouveaux marquages sur les secteurs intermédiaires pour identifier les causes de probables pertes en ligne (mesure 50) tout en continuant à marquer des individus en estuaire aval.

Ce rapport s'articulera en trois parties. En amont de ce projet, l'étape préliminaire a été de synthétiser les connaissances biologiques sur cette phase du cycle de vie ainsi que sur les méthodes d'investigations disponibles. C'est cette synthèse qui est présentée dans le premier volet. Un bilan de cette première année d'étude sera ensuite dressé et permettra finalement de proposer, dans une 3ème et dernière partie, une discussion quant aux résultats de ce projet et son éventuelle poursuite.

## II. Synthèse bibliographique des connaissances biologiques et méthodologiques disponibles

Les études portant sur la migration estuarienne des Saumons atlantiques se déclinent en deux grands volets. Certaines d'entre elles traitent des mouvements des Saumons en estuaire (mouvements vers l'aval, phases d'attente, mouvements vers l'amont...) et d'autres traitent davantage du lien entre paramètres hydro-environnementaux (température, marée, débit...) et comportement du Saumon. Ce lien est étudié via la recherche de conditions pouvant déclencher la migration des Saumons vers l'amont ou la recherche des contraintes pouvant s'exercer sur les Saumons en termes d'exigences environnementales (température notamment). Peu d'études ont utilisé l'outil de télémétrie acoustique mais les méthodes et les résultats sont très intéressants pour mieux comprendre la migration estuarienne du Saumon et adapter le protocole utilisé pour cette étude.

### *A. Capture des géniteurs de Saumons en estuaire*

#### **Matériel de capture**

Différentes techniques de capture des Saumons en estuaire ont été utilisées dans la littérature. La plupart des auteurs ont utilisé des filets trémails qui sont des filets composés comme leur nom l'indique de trois « mailles », en réalité trois nappes de filets. La nappe centrale est composée de mailles plus fines que les deux nappes extérieures, le poisson reste ainsi piégé au centre du filet, entre les deux mailles extérieures. Les filets utilisés sont des filets dérivants, préférables en estuaire du fait des courants importants pouvant s'y exercer. Dans l'estuaire de l'Usk, aux pays de Galles, un filet trémail dérivant (maille intérieure de 51 mm, maille extérieure de 152 mm, 1,83 m de hauteur et 274,3m de longueur) a été utilisé pour capturer des Saumons atlantiques (Aprahamian, Jones et Gough, 1998). Les filets dérivants ont été également utilisés par l'IFREMER durant l'expérience de marquage acoustique des Saumons remontant l'Adour (Bégout Anras, 2001). Au cours de cette expérience, les auteurs montrent que les Saumons sont capables d'éviter les filets dérivants soit en les contournant soit en sondant sous le filet.

D'autres techniques comme le filet maillant, constitué d'une seule nappe, ont également été utilisées. Olson et Quinn (1993) ont utilisé un filet maillant de maille 105 mm (maille étirée de 210 mm) et de 12 m de hauteur. Cette technique a été utilisée pour capturer des Saumons Chinook dans la rivière Columbia.

Enfin, des « filets-pièges » ou « verveux », sortes d'entonnoir conduisant les poissons dans une impasse ont été utilisés par Stasko pour capturer les Saumons de la rivière Miramichi (Stasko, 1975).

Ces trois techniques de capture présentent divers avantages et inconvénients. La technique la moins traumatisante pour le poisson reste le verveux mais sa mise en place dans un estuaire comme celui de la Loire paraît très délicate. La contrainte majeure réside dans le fait que cette zone de l'estuaire de Loire est très fréquentée des embarcations de tous types avec notamment de très gros gabarits comme les ligériennes qui ravitaillent en charbon l'usine EDF de Cordemais. D'autre part, la présence de nombreux débris flottants et les forts courants présents dans la zone rendent difficile l'implantation d'un engin de pêche dormant comme celui-ci.

Le filet maillant pose le problème de survie des poissons. Les blessures dues au filet, associées au traumatisme du marquage mettent en péril sa survie. Le département canadien des pêcheries et des Océans estime qu'entre 35 et 70 % de tous les Saumons coho pris au filet maillant meurent très rapidement après avoir été pris dans le filet (Coho Response Team, 1998). Le filet trémail dérivant

semble être une bonne alternative : le poisson est piégé à l'intérieur des nappes extérieures et non systématiquement maillé par les ouïes comme cela peut être le cas avec le filet maillant. De plus les pêcheurs professionnels qui travaillent en estuaire de Loire sont accoutumés à cette technique.

## **Protocole de capture**

### *Action de pêche et cycle de marée*

La pêche des Saumons s'effectue très souvent autour des étales de marée basse. Les Saumons atlantiques de la rivière Usk (Aprahamian, Jones et Gough, 1998) ont été pêchés en commençant la pêche 3 h avant l'étales de basse mer et en terminant 2 h après celle-ci. Sur l'Adour, le protocole de capture mis en place par IFREMER pour capturer des Saumons était également focalisé sur les étales de marée basse en pêchant entre 1 h avant la basse (BM) mer et 2 h après (Bégout Anras, 2001). Cette fenêtre de temps semble être la plus propice pour capturer des Saumons en estuaire. Jackson et Howie, 1967 évoquent le fait que d'après les chiffres du département de l'agriculture et des pêches irlandais, 71% des Saumons en 1959 et 85% en 1960 ont été pris par les pêcheurs aux filets entre 2 h avant et 2 h après l'étales de basse mer (avec une majorité dans les 2 h suivant la basse mer). Ces tendances s'expliqueraient par une forte propension des Saumons à entrer dans les estuaires au début de la marée montante, entre 1 h et 3 h après la basse mer selon Potter, 1988 qui a mené une expérience de marquage de Saumons atlantiques dans l'estuaire de la rivière Fowey avec des transmetteurs radio et acoustiques.

La pêche des Saumons autour des étales de marée basse semblent donc à privilégier pour augmenter les chances de captures. La plupart des poissons sont capturés dans de faibles profondeurs (environ 5m) (Olson et Quinn, 1993). Les zones de faible profondeur seraient également à privilégier pour capturer les Saumons en estuaire.

### *Durée des actions de pêche*

Des actions de pêche courtes sont menées afin de réduire le temps de séjour des Saumons dans le filet et préserver leurs chances de survie. Olson et Quinn, 1993 ont effectué des actions de pêche de 5 minutes. Des actions de pêche aussi courtes sont difficilement envisageables en estuaire de Loire avec un filet trémail de taille conséquente (180m).

## ***B. Suivi individuel de la migration estuarienne***

### **Techniques de suivi (marque active vs passive, radio vs acoustique, suivi actif vs passif)**

L'étude des migrations des poissons peut se faire en utilisant différentes technologies et différentes méthodes et parfois en combinant ces approches.

Les systèmes de télémétrie basés sur les ondes radio sont généralement utilisés pour les eaux peu profondes et de faible conductivité, telles que les eaux continentales. A l'inverse, la technologie hydroacoustique est particulièrement adaptée aux eaux saumâtres ou salées (Priede, 1991). Les études menées sur les Saumons en estuaire ou en rivière impliquent très souvent l'utilisation de

marques acoustiques ou radio qui émettent des signaux individuels détectés par des récepteurs. De nombreuses études utilisent de façon combinée ces deux types de marques, ce sont les CART (Combined Acoustic and Radio Tags) (Salomon et Potter, 1988 ; Smith et Smith, 1997 ; Potter, 1988 ; Aprahamian, Jones et Gough, 1998). Les marques actives émettent un signal permettant une identification individuelle (trains de pulses) à des intervalles fixés par l'utilisateur. Certaines données peuvent également être mesurées par la marque (température, pression, profondeur par exemple...)

Les récepteurs peuvent être fixes (suivi passif) ou embarqués (suivi actif ou pistage). Le suivi passif présente l'avantage de permettre un suivi 24H/24H. En revanche, il nécessite un réseau assez dense de récepteurs pour permettre de détecter les poissons le plus souvent possible. Cette approche est efficace dans le cas d'un suivi sur le cours d'un fleuve ou d'une rivière. En effet, si l'on cherche à étudier la remontée du poisson, c'est son parcours longitudinal qui est intéressant, et un réseau de récepteurs placés le long du cours d'eau permettra de bien répondre à cette question. Le pistage avec un récepteur embarqué quant à lui, permet de suivre de manière plus précise la trajectoire du poisson. En revanche, cette approche nécessite beaucoup plus de temps pour être mise en place et est difficilement envisageable pour un suivi en continu sur une longue période. Cependant cette technique peut être utilisée en complément de la première, notamment pour suivre des zones situées par exemple entre deux zones couvertes par des récepteurs fixes.

Le suivi passif des Saumons peut être réalisé à l'aide de récepteurs fixes implantés sur les bords de l'estuaire (Aprahamian, Jones et Gough, 1998) ou sur des bouées (Smith et Smith, 1997) ou les deux simultanément (Potter, 1988). Installés sur des bouées, les hydrophones sont placés à quelques mètres sous la surface, la « tête » de l'hydrophone étant orientée vers le fond. Sur le plan vertical, les hydrophones forment une aire de détection quasiment sphérique avec une légère « zone d'ombre » située au dessus de l'hydrophone. Cette « zone d'ombre » forme un cône où la détection est réduite bien que le signal puisse être détecté indirectement par les phénomènes de réflexion et/ou de réfraction de celui-ci dans la colonne d'eau (Heupel, Semmens et Hobday, 2006). Les rayons de détection des hydrophones varient fortement en fonction des contextes d'étude (de 600 à 800m pour Heupel, semmens et Hobday, 2006 ; de 130 à 440m pour Aarestrup et al., 2010).

Le suivi actif est réalisé grâce à un récepteur mais également à l'aide d'un bateau utilisant un récepteur embarqué (Stasko, 1975 ; Olson et Quinn, 1993 ; Brawn, 1982 ; Bégout Anras, 2001).

Des marques passives qui ne sont détectées que lorsqu'elles se situent à proximité immédiate (au mieux quelques dizaines de centimètres d'une antenne réceptrice) peuvent être utilisées. Ces marques ne sont utiles que lorsque l'on peut équiper un passage étroit et obligatoire pour le poisson avec un récepteur comme une passe à poissons par exemple ou lorsque l'on effectue une recapture avec un lecteur de marque pour déceler des poissons déjà marqués. Cet outil peut être très utile pour étudier les composantes de la migration du poisson en divers aspects. Il peut fournir un timing de la migration entre l'estuaire et les zones amont : en équipant les poissons de marques passives en estuaire et en les détectant sur une passe à poissons située en amont du fleuve, on peut ainsi connaître le temps nécessaire à la remontée jusqu'aux frayères. D'autre part la détection en amont d'un poisson marqué en estuaire permet également d'utiliser des méthodes de marquage-recapture pour estimer des mortalités. En multipliant les recaptures intermédiaires le long d'un fleuve, on peut estimer des mortalités par zones du fleuve, et ainsi évaluer des éventuelles zones à problèmes pour la migration.

Ces méthodes peuvent être utilisées seules ou bien combinées.

## **Stabulation, anesthésie, marquage, relâcher,...**

Les poissons peuvent être conservés dans un bac d'eau (Olson et Quinn, 1993) et le marquage est effectué après examen du poisson (absence de cicatrices, peu d'écaillés manquantes). Pour être manipulés, les Saumons doivent recevoir une légère sédation provoquée par balnéation dans un anesthésiant. Les tags acoustiques sont insérés dans l'estomac du poisson au moyen d'un tube au bout duquel est placé le tag qui sera implanté simplement en poussant légèrement sur un piston après introduction dans l'estomac. Stasko et Pincock, (1977), considèrent cette méthode peu traumatisante. Rivinoja, (2006) et Fried et al., (1976) affirment qu'elle n'affecte pas les performances de nage du poisson. Cependant Bernard et al., (1999) suggèrent que le fait de manipuler le poisson induit un retard migratoire et des mouvements aval du Saumon Chinook.

Le rapport poids de l'émetteur / poids total du poisson dans l'air n'excède jamais 2% conformément au seuil généralement admis dans la littérature (Connors et al., 2002). Le taux moyen de régurgitation des tags acoustiques est d'environ 15 % (Smith et al., 1998). Les tags passifs sont implantés dans la cavité générale au moyen d'une petite boutonnière réalisée au scalpel.

Après marquage les poissons peuvent être placés dans un bac d'eau pendant 30 à 45 minutes pour récupérer (Olson et Quinn, 1993 ; Aprahamian, Jones et Gough, 1998), dans une cage *in situ* (Hawkins et al., 1979) ou relâchés immédiatement (Brawn, 1982)

## **C. Migration des Saumons et facteurs environnementaux**

### **Mouvements horizontaux**

#### *Cycles tidaux*

Les expériences menées en télémétrie en estuaire montrent que tous les Saumons ne quittent pas l'estuaire pour s'engager vers les zones amont. Selon l'étude d'Aprahamian, Jones et Gough (1998) une partie des poissons marqués avec des émetteurs acoustiques remonte l'eau douce (41 %), une autre sort de l'estuaire (35%), certains restent dans l'estuaire (19.6%) et une faible part (3,6 %) a été perdue. Toutefois la redescente en mer des poissons n'implique pas forcément une sortie définitive de l'estuaire, une part des poissons marqués qui sont effectivement montés en eau douce ont fait des retours en mer préalables (Aprahamian, Jones et Gough, 1998).

Les Saumons peuvent arrêter momentanément leur migration. Brawn (1982) a observé des arrêts dans la migration allant jusqu'à 3 mois et demi. Quoi qu'il en soit, les poissons une fois entrés en estuaire, ne migrent pas en une seule marée mais dans des conditions normales ils restent environ deux jours en estuaire (Jackson et Howie, 1967).

En estuaire, les poissons sont soumis aux courants de marée. Ces courants ont bien évidemment une influence sur le comportement migratoire des poissons. Les changements de direction, et de stabilisation sont souvent associés à un changement de la marée (Olson et Quinn, 1993). Il semble bien établi pour la plupart des auteurs comme Brawn (1982) que les poissons se déplacent dans le sens des courants de marée. Potter (1988) observe qu'entre 70 et 90% des mouvements vers l'amont se font dans le sens de la marée. Les courants de marée étant orientés de façon contraire selon qu'il s'agisse d'une marée montante ou descendante, les poissons ont forcément une utilisation préférentielle de ces courants afin d'avoir une résultante migratoire

positive vers l'amont. Aprahamian, Jones et Gough (1998) observent des migrations avec le flot et une stabilisation sur place pendant le jusant. Stasko (1975) identifie des groupes de poissons selon que ceux-ci ont une résultante de déplacement migratoire vers l'amont, une résultante nulle ou une résultante migratoire vers l'aval. Pour les poissons à résultante migratoire vers l'amont, le ratio des périodes avec ou contre le courant est significativement différent pendant les jusants par rapport aux flots. Tous les poissons progressent vers l'amont pendant le flot que ce soient des poissons à résultante montante ou descendante. Pendant les jusants, les poissons à résultante montante passent plus de temps que les autres à combattre le courant (Stasko, 1975). Les poissons montants (par rapport aux poissons à résultante aval) sont davantage montés vers l'amont pendant les étales (hautes et basses) et passent plus de temps à se maintenir contre le courant de jusant et s'arrêter. Ainsi, la remontée des Saumons vers l'amont en estuaire résulte principalement de l'action de contenir le jusant et d'une nage active pendant les étales (Stasko, 1975). Toutefois, on observe également des phases d'immobilité pendant le flot et de nage active contre le courant pendant le jusant chez les Saumons atlantiques (Stasko, 1975). Elles doivent être coûteuses d'un point de vue énergétique mais peuvent possiblement présenter des avantages en termes d'indices pour s'orienter (Stasko, 1975). Une orientation améliorée pendant le jusant est en accord avec l'hypothèse de Hasler (1966) selon laquelle la présence de particules olfactives de la rivière d'origine motive le poisson à nager contre le courant.

Les poissons peuvent aussi utiliser préférentiellement certaines périodes du cycle de marée. Un tiers des mouvements dans la rivière Usk se produisent dans l'intervalle [BM+1h ; BM+3h]. (Aprahamian, Jones et Gough, 1998). Dans la rivière Fowey, Potter (1988) rapporte que les entrées et sorties de Saumon en estuaire se font à tous les états de la marée mais il semblerait y avoir une forte tendance des poissons à entrer dans l'intervalle [BM+1h ; BM+3h]. Hayes (1953), quant à lui montre que les Saumons semblent entrer davantage à marée haute. Il n'y aurait pas de lien évident avec le cycle de marée selon Smith et Smith (1997). En estuaire, les mouvements se produiraient plutôt au jusant alors que les mouvements d'entrée en eau douce proprement dite (non soumise à la marée) se feraient dans toutes les conditions tidales (Smith et Smith, 1997). Ainsi il n'y a pas vraiment de consensus concernant l'influence de la marée sur les Saumons en estuaire dans la littérature. Etant donné les très grandes différences physiques, chimiques et hydrographiques entre les estuaires, la variabilité dans les réponses observées chez le Saumon atlantique ne semble pas si surprenante (Smith et Smith, 1997).

### *Coefficients de marée*

Les petits coefficients augmentant à la suite des mortes eaux provoqueraient la concentration des Saumons en estuaire (Hayes, 1953 ; Jackson et Howie, 1967). C'est pourquoi Jackson et Howie (1967) constatent que le nombre journalier de poissons empruntant la passe à poissons de l'Erne montre une légère augmentation des marées de mortes eaux aux marées de vives eaux et que cela serait une illustration de la concentration des poissons en estuaire pendant les mortes eaux. Nordqvist (1924) suggère que l'absence de migration des Saumons pendant les marées de vives-eaux s'expliquerait par la présence d'une « eau trouble », qui n'inciterait pas le Saumon à franchir certains obstacles à cause de la mauvaise visibilité. Dans les estuaires turbides, les marées de vives-eaux accentuent encore davantage ce phénomène ce qui laisserait à penser que la turbidité serait en partie responsable des patterns de migration estuariens. Banks (1969) affirme que dans les eaux turbides, la migration peut se produire à la fois le jour et la nuit.

## Mouvements verticaux

Les Saumons migrent principalement en surface entre 1 et 5 m (Bégout Anras, 2001). Ils semblent montrer une préférence pour les zones d'au moins 3m de profondeur, mais au sein de ces zones, pas de préférences pour les zones de plus de 5 m (Brawn, 1982). Certains Saumons (Saumons chinook) nagent en surface alors qu'il existe de forts gradients de salinité et de température et descendent en profondeur occasionnellement alors que d'autres chinooks nagent parfois en profondeur et parfois en surface (Olson et Quinn, 1993).

## Vitesses

La vitesse moyenne de migration en estuaire est de 2,33 km.h<sup>-1</sup> pour les géniteurs de Saumon Chinook (Olson et Quinn, 1993). Elle est de 1,73 km.h<sup>-1</sup> pour le Saumon atlantique dans la rivière Fowey (Potter, 1988), ou bien encore de 2,3 km.h<sup>-1</sup> dans l'estuaire Sheet Harbour en Nouvelle Ecosse (Brawn, 1982). Les vitesses observées sont comprises entre 2,2 km.h<sup>-1</sup> et 2,6 km.h<sup>-1</sup> dans l'estuaire de l'Usk aux pays de Galles (Aprahamian, Jones et Gough, 1998). Elles sont comprises entre 1,4 et 2,9 km.h<sup>-1</sup> dans l'estuaire de l'Adour en France (Bégout Anras, 2001). Les vitesses moyennes dans tous les estuaires sont donc relativement similaires et proches de 2 km.h<sup>-1</sup>. Les vitesses semblent plus importantes pendant le jusant révélant un effet additif du courant de la rivière (Olson et Quinn, 1993).

## Rythmes circadiens

Il n'y a pas de consensus dans la littérature concernant une hypothétique fenêtre horaire préférentielle concernant les mouvements des Saumons en estuaire. Les Saumons atlantiques entrent dans la rivière Tornionjoki à toutes les heures de la journée (Lilja et Romakkaniemi, 2003). Potter (1988) constate que les Saumons quittent la zone sous influence tidale la plupart du temps la nuit sauf en cas de débits importants, au cours desquels les Saumons la quittent aussi le jour. Les Saumons entreraient en rivière au crépuscule et Hayes (1953) suggère que le stimulus de ce mouvement serait un changement dans l'intensité lumineuse. La plupart des mouvements de Saumons (60%) qui remontent l'Aberdeenshire Dee en Ecosse se produisent la nuit (Smith et Smith, 1997). Jackson et Howie (1967) constatent que le nombre de Saumons empruntant la passe à poisson située dans l'estuaire amont de l'Erne (Irlande) est plus important le soir et que la migration cesse quasiment la nuit. Cependant ce propos est à nuancer par le fait que cette portion de l'estuaire est très illuminée la nuit à cause de la centrale qui la borde. Lilja et Romakkaniemi (2003) constatent qu'il n'y a pas de périodicité journalière dans les heures d'entrée des Saumons en rivière sous les hautes latitudes (Lilja et Romakkaniemi, 2003 ; Erkinaro et al., 1999) alors que les Saumons semblent privilégier le crépuscule et la nuit sous les plus basses latitudes (Potter, 1988 ; Laughton, 1991 ; Smith et Smith, 1997). L'absence de périodicité sous les hautes latitudes semble indiquer qu'il n'y a pas d'avantages pour les Saumons à privilégier une certaine heure de la journée. L'influence de la luminosité sur les mouvements des Saumons doit être également très dépendante de la turbidité des eaux estuariennes, elle-même très variable selon les estuaires.

## **Comportement grégaire des Saumons en estuaire**

Les Saumons semblent rester en groupe en estuaire et s'éloigner du groupe très ponctuellement (Brawn, 1982). La présence simultanée de Saumons à migration précoce en estuaire et de Saumons qui migrent plus tard suggère que cette différence comportementale entre les 2 groupes s'opérerait en estuaire (Brawn, 1982).

### **Vents**

Des vents de mer associés à de petits coefficients augmentant provoqueraient la concentration des poissons en estuaire (Hayes, 1953).

### **Débit**

Le débit est la variable environnementale la plus souvent mentionnée comme contrôlant la migration anadrome du Saumon atlantique (Banks, 1969 ; Alabaster, 1970). Il est généralement indiqué qu'une augmentation significative de débit stimule les Saumons à remonter les rivières (Jensen et al., 1986 ; Mills, 1989 ; Laughton, 1991 ; Trépanier et al., 1996). En revanche, Erkinaro et al., (1999) n'ont pas trouvé de différences significatives de débits entre les jours à fortes remontées de Saumons et les jours à faibles remontées dans la rivière Tana. Lilja et Romakkaniemi (2003) font de nouveau la distinction entre rivières de hautes latitudes et rivières de basses latitudes. Sous les hautes latitudes, une variation à court terme de débit pourrait jouer un rôle moindre car le débit baisse de manière régulière après les grandes crues annuelles et printanières de ces larges rivières et les Saumons auraient beaucoup d'espace pour trouver facilement des routes migratoires alternatives. Le Saumon atlantique évite les débits les plus importants, comme le montrent les délais entre le pic de débit et le pic de remontées. Ils privilégieraient des débits supérieurs à la moyenne pour remonter mais pas forcément les débits extrêmes car aucun referendum de débit n'a été démontré de même que des arrêts de migration ont pu être montrés pour des débits très importants (Alabaster, 1970 ; Jackson et Howie, 1967). Selon Hayes (1953), les augmentations de débit artificielles ou naturelles (crues) ne provoqueraient pas à elles seules des remontées de Saumons. Pendant les périodes de faibles débits les poissons semblent retourner en mer pendant des périodes variables alors que lors des périodes de plus fort débits, les poissons semblent rester davantage en estuaire (Potter, 1988). Jackson et Howie (1967) pensent qu'une remontée de Saumons après de fortes pluies est plus le résultat d'un changement de la composition de l'eau (concentration en oxygène dissous par exemple) que de la pluie elle-même ou du débit.

## Oxygène dissous

Priede et al., (1988) ont tenté d'établir une échelle des effets du taux d'oxygène dissous sur les capacités migratoires des Saumons atlantiques en estuaire (en considérant que les températures sont dans une gamme de 15°C à 20°C) :

**Oxygène dissous < 4 mg.l<sup>-1</sup>** : migration inhibée, possible mortalité des poissons. Ils se laissent porter par les courants de marée.

**4 mg.l<sup>-1</sup> < O<sub>2</sub> < 5 mg.l<sup>-1</sup>** : les poissons peuvent migrer selon certaines conditions, il y a seulement une petite marge de sécurité physiologique. Ces conditions sont susceptibles d'entraîner des probabilités de mortalités accrues.

**5 mg.l<sup>-1</sup> < O<sub>2</sub> < 6 mg.l<sup>-1</sup>** : bonnes conditions si les courants contraires ne sont pas trop forts.

**O<sub>2</sub> > 6 mg.l<sup>-1</sup>** : conditions optimales d'oxygène dissous pour la migration des Saumons.

Les impacts sur les migrations des Saumons en estuaire de Loire pour différentes valeurs d'oxygène ont été relevés par le GIP Loire estuaire. Les limites relevées par le GIP sont sensiblement les mêmes que celles relevées par Priede et al., (1988). Le GIP Loire Estuaire évoque des mortalités des Saumons pour des teneurs inférieures à 3 mg.l<sup>-1</sup>, une migration incertaine pour des valeurs comprises entre 3 et 5 mg.l<sup>-1</sup> et de bonnes conditions de migration pour des valeurs supérieures à 5 mg.l<sup>-1</sup> (GIP Loire Estuaire, 2012).

## Température

La température de l'eau a une forte incidence sur les salmonidés en général, qu'ils soient migrateurs ou non. Elle a une incidence sur le déclenchement de la migration notamment dans les rivières des hautes latitudes mais elle a surtout une incidence sur l'arrêt de celle-ci lorsque les températures deviennent trop hautes. Ce sont des espèces qui vivent généralement dans des eaux assez froides et bien oxygénées. Jensen et al., (1986) indiquent qu'aucune migration des Saumons n'est observée dans la rivière Vefsna lorsque la température de l'eau est inférieure à 8°C.

La température de l'eau joue un rôle clef dans la capacité de celle-ci à contenir de l'oxygène dissous disponible pour les poissons. Alabaster (1990) a montré que le taux de migration des Saumons sur la rivière Axe (Devon, Angleterre) diminuait au fur et à mesure que la température de l'eau augmentait pour les mois de mai à août et par extrapolation de la relation trouvée il a montré que la migration cesserait pour une valeur mensuelle moyenne de 24,9 °C. Elle cesserait pour une température moyenne journalière de 25,7 °C sur la rivière La Have (Nouvelle Ecosse) (Hayes, 1953) ou une température moyenne hebdomadaire de 26,7°C sur la rivière Dee, Pays de Galles (Alabaster, 1990). De bonnes remontées de Saumons sur la rivière Erne en Irlande sont observées jusqu'à des températures de 20°C (Jackson et Howie, 1967).

### **III. Bilan de la première campagne de pêche « Evaluation du stock de Saumons entrant dans l'estuaire de la Loire et étude du comportement migratoire jusqu'aux secteurs amont »**

#### ***A. Matériel et méthode***

##### **L'estuaire de la Loire**

L'estuaire se définit par la partie du fleuve sous influence de la marée dynamique ce qui correspond à 95 km pour la Loire, délimité entre la limite transversale à la mer (Saint-Nazaire) et la limite de remontée de la marée dynamique (commune d'Anetz). En aval de Nantes, le fleuve est creusé par un profond chenal de navigation qui le relie à l'océan. En amont, le fleuve est marqué par une succession d'épis et d'îles qui amorce l'entrée dans la Loire fluviale.

L'estuaire de la Loire montre également une très forte variabilité physico-chimique au niveau spatio-temporel. Des paramètres tels que la température, le taux de matières en suspension, le taux d'oxygène dissous et le débit sont variables au niveau spatial selon leur position le long d'un gradient longitudinal mais également au niveau temporel à l'échelle du cycle de marée ou de l'année.

L'une des grandes manifestations de cette hétérogénéité spatio-temporelle est le phénomène de bouchon vaseux. Il se caractérise par une zone de l'estuaire où la concentration en matières en suspension (MES) excède  $1 \text{ g.L}^{-1}$  et généralement localisée dans les parties aval de l'estuaire (Etcheber et al., 2007). Associées à cette forte turbidité, des conditions hypoxiques caractérisées par une concentration en oxygène inférieure à  $5 \text{ mg.L}^{-1}$  qui peut diminuer jusqu'à  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  peuvent être observées (Thouvenin et al., 1994 ; Abril et al., 1999).

Le site d'étude est délimité par le linéaire couvert par le réseau d'hydrophones. Il s'étend de Saint-Nazaire à Avoine (Figure 2). La liste et le positionnement des hydrophones installés est disponible en Annexe. (Annexe 1).

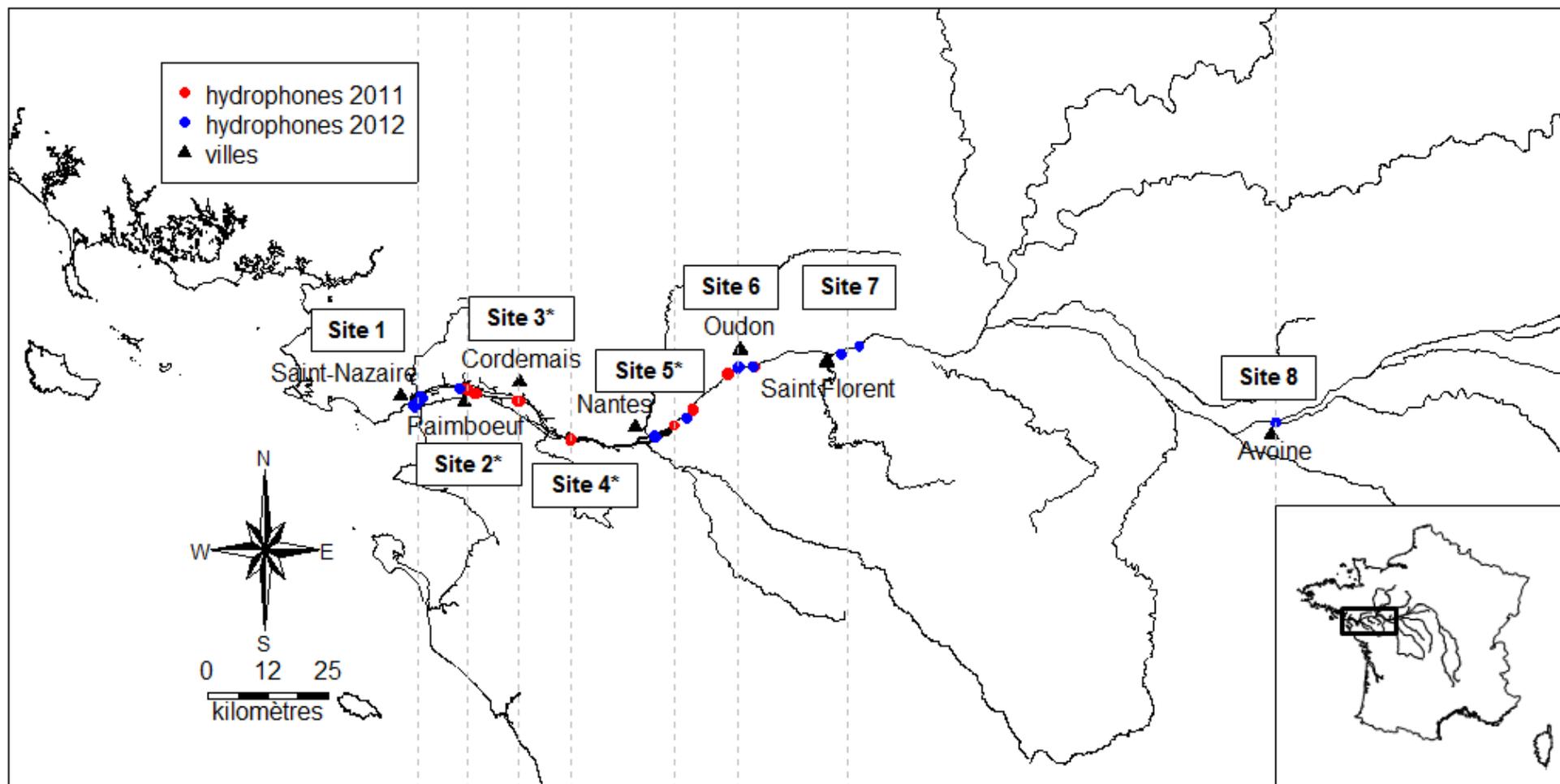


Figure 2 : Réseau d'hydrophones en place en Loire en 2012. 34 hydrophones sont répartis sur 8 sites. Les sites marqués d'un astérisque comportent au moins une station de mesure du réseau SYVEL.

## **Données environnementales disponibles dans l'estuaire de la Loire**

### *Données hydrologiques*

Les données hydrologiques relatives à l'estuaire de la Loire ont été obtenues auprès de différentes institutions. Les données de hauteurs d'eau de la Loire ont été obtenues auprès du service de prévention des crues de la DDT 49 et sont mesurées à Ancenis. Ce sont des moyennes horaires de hauteur d'eau. Le débit de la Loire est mesuré à Montjean-sur-Loire (49) et les données ont été obtenues auprès du service hydrométrie de la DREAL. Il s'agit de données horaires de débit. Enfin les coefficients de marée à Saint-Nazaire ont été obtenus auprès du port autonome de Nantes-Saint-Nazaire.

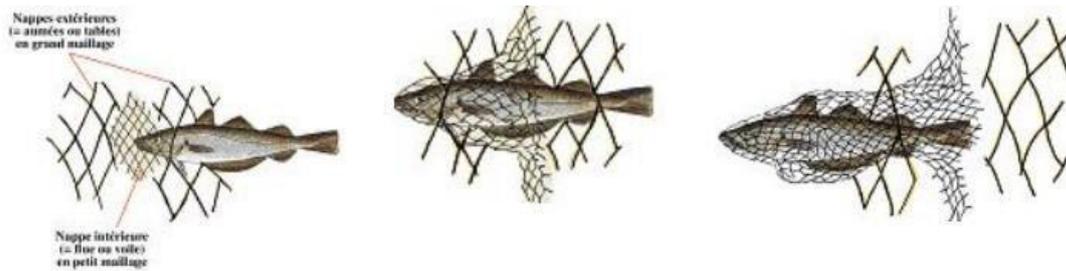
### *Données physico-chimiques*

Les paramètres physico-chimiques tels que la température de l'eau, la teneur en oxygène dissous, la salinité et la teneur en matières en suspension ont été obtenues via le réseau SYVEL géré par le GIP Loire estuaire. Ce réseau comporte 6 stations de mesure réparties dans l'estuaire (Figure 2) mais uniquement dans sa partie aval (Donges, Paimboeuf, Cordemais, Le Pellerin, Trentemoult et Bellevue). Les mesures sont réalisées entre quelques dizaines de centimètres et 1 m sous la surface de l'eau selon les stations.

## **Captures**

### *Matériel*

La pêche est effectuée au moyen d'un filet tramail dérivant utilisé par les pêcheurs professionnels estuariens pour la capture des Aloses. On parle de filet dérivant car il est positionné à proximité de la surface et n'est pas retenu par un ancrage (source Ifremer, page consultée le 11/03/2013). La partie supérieure du filet comporte des flotteurs qui permettent de suivre la dérive du filet mais également de repérer lorsqu'un poisson est pris (Annexe 2). Constitué de plusieurs nappes, il prend le nom de filet emmêlant. En effet ce type de filet capture les poissons par emmêlement, à la différence du filet maillant droit qui les retient par différents appendices. Le trémail est formé de trois nappes adjacentes. Les deux nappes extérieures (les aumées) sont à larges mailles. La nappe intérieure (la flue) est plus grande pour donner du flou et à mailles plus petites. Le poisson s'avance, rencontre la maille intérieure et continue jusqu'à former une poche où il est emprisonné après être passé dans la maille extérieure (Figure 3). C'est la pêche par emmêlement. Le filet utilisé en Loire possède un maillage de 60 mm pour la nappe intérieure et 200 mm pour les nappes extérieures. Sa longueur varie suivant les conditions de pêche (marée haute ou marée basse) de 160 m à 320 m.



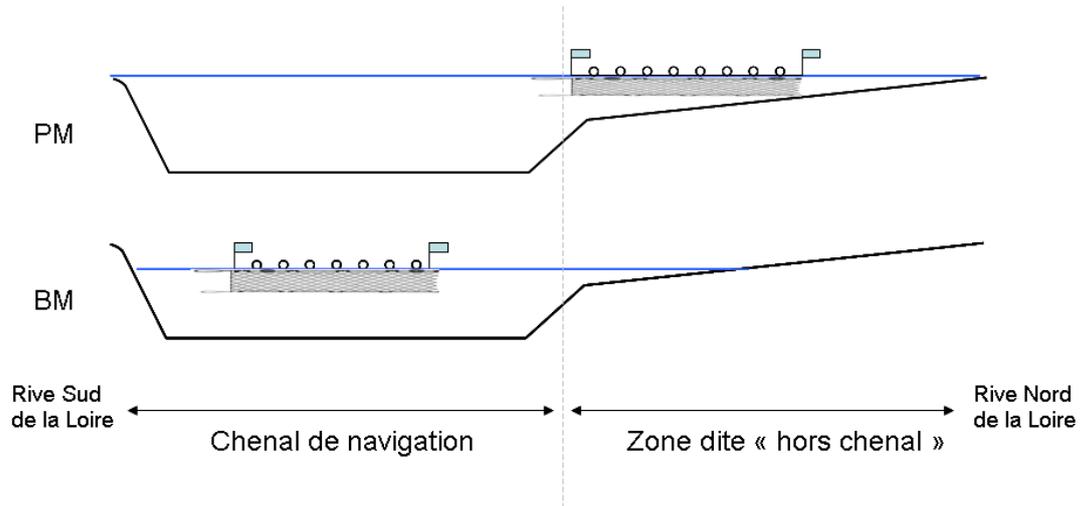
**Figure 3 : Principe de capture des poissons par le filet trémail (Source Ifremer : <http://wwwz.ifremer.fr/peche/Le-monde-de-la-peche/La-peche/comment/Les-engins/Filet-maillant>)**

### *Action de pêche*

La pêche s'effectue aux abords des étales de marée haute et basse de manière à pratiquer la pêche au trémail dérivant dans des conditions de courant acceptables.

A marée haute, l'action de pêche est effectuée sur une zone hors chenal de navigation. C'est sur cette zone que pratiquent les pêcheurs estuariens lorsqu'ils ciblent l'Alose ou la lamproie. Dans cette zone, la profondeur est moindre mais permet tout de même de pêcher à marée haute. L'action de pêche dure entre 1h30 et 2H selon les conditions de courant.

A marée basse, l'action de pêche ne peut s'effectuer sur les mêmes zones pour des raisons de profondeur. Le filet est donc positionné en travers du chenal de navigation. La pêche à marée basse nécessite donc de redoubler de vigilance quant à l'arrivée probable de bateaux à gros gabarits. Il faut soit décaler le filet ou le retirer s'il n'y a pas assez de temps. L'action de pêche à marée basse dure en général légèrement moins de temps qu'à marée haute soit environ entre 1H et 1H30 de pêche.



**Figure 4 : Zone de pêche à marée haute (PM) et à marée basse (BM) positionnée sur une coupe transversale Nord-Sud de la Loire au niveau de Cordemais.**

## Principe de la télémétrie acoustique et matériel utilisé

### Principe de la méthode

La télémétrie hydroacoustique utilise la propagation d'ondes ultrasonores entre un émetteur (ou « tag ») et un récepteur (ou « hydrophone ») (Annexe 3) qui convertit les ondes reçues en énergie électrique. Le signal est généré au niveau de l'émetteur par un anneau en céramique compact. Cette particularité rend inutile la présence d'antenne, ce qui permet aux marques acoustiques d'être de petite taille et de limiter les problèmes liés à l'implantation dans le poisson (Priede, 1991).

Le signal acoustique peut être codé, ce qui permet le suivi simultané de plusieurs poissons utilisant une même fréquence d'émission (Thorstad et al., 2000). Les émetteurs produisent des séquences (« pings ») de 6 impulsions sonores (« pulses ») d'une durée de 10ms à intervalles irréguliers et séparés par un délai aléatoire, compris, dans notre cas, entre 20 et 40 secondes. L'intervalle de silence entre les 7 pulses permet de définir un code identifiant spécifiquement le poisson marqué (Figure 5).

Les émetteurs hydroacoustiques employés sont des MP-13 (20-40s) fabriqués par la société Thelma Biotel.

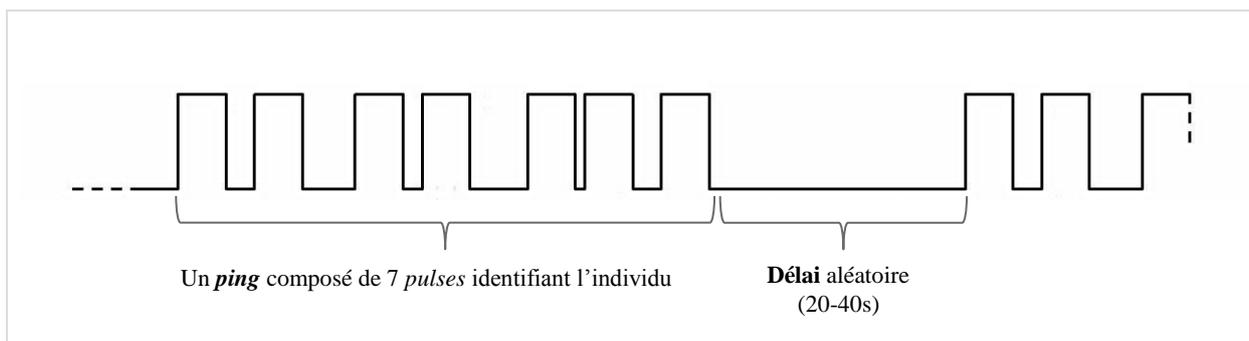
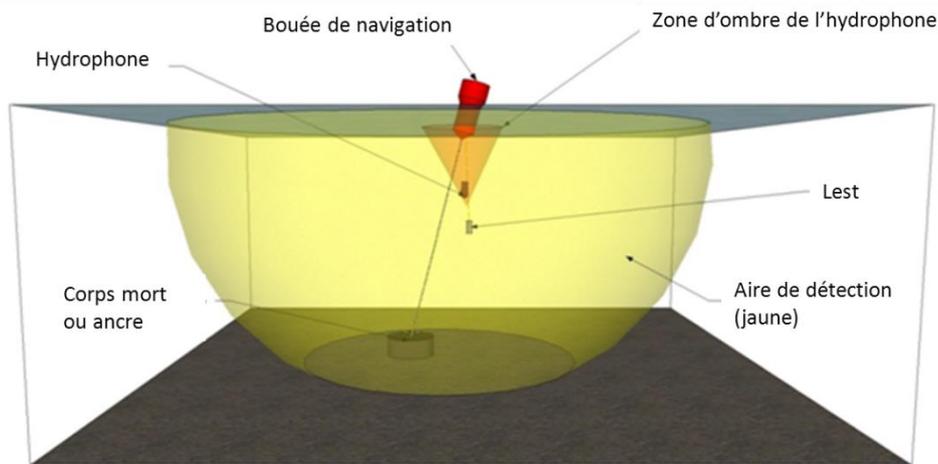


Figure 5: Représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques – source : GADAIS, R. 2011

La durée de vie des batteries, garantie par le constructeur, est d'environ 430 jours. L'émetteur peut, par conséquent, continuer de fonctionner après la mort du poisson et sera donc potentiellement détectable s'il se situe dans l'aire de détection des hydrophones.

### Installation des hydrophones

L'installation des hydrophones a été effectuée en deux temps (Figure 2). Une première phase d'installation a eu lieu fin 2010-début 2011. Dix-sept hydrophones ont alors été mis en place dans l'estuaire de la Loire entre Paimboeuf et Oudon. Ces hydrophones ont été déployés pour former des sites de détection en travers du cours d'eau et ainsi délimiter des compartiments. La position de ces sites acoustiques a été déterminée en fonction des caractéristiques hydrauliques et hydro-morphologiques de l'estuaire en concertation avec le GIP Loire Estuaire. Les hydrophones ont été fixés sur des balises (Figure 6 et Annexe 3) ou pontons de navigation préexistants en concertation et collaboration avec les Voies Navigables de France (amont de Nantes), le GIP Loire Estuaire et la Société des Phares et Balises (en aval de Nantes).



**Figure 6 : Système d'installation principal des hydrophones sur les bouées et balises de navigation – source : GADAIS, R. 2011**

Début 2012, dix-sept nouveaux hydrophones ont été déployés selon le même procédé afin de compléter le réseau déjà en place (ex : ajout d'un site d'écoute à Saint Nazaire pour délimiter une zone potentielle d'attente à la migration) mais aussi pour pallier aux problèmes de détection observés au niveau de Nantes ainsi qu'à l'amont. Les 2 sites de détection les plus amonts (St Florent le vieil et Avoine) sont gérés par deux pêcheurs professionnels qui en assurent l'entretien : M. Nicolas Hérault et M. Yannick Perraud. Un total de 34 hydrophones, constituant 7 sites acoustiques étaient donc en place dans l'estuaire de la Loire au printemps 2012 pour les migrations de Saumons, de lamproies et d'Aloses (Figure 3).

#### *Performance du réseau acoustique*

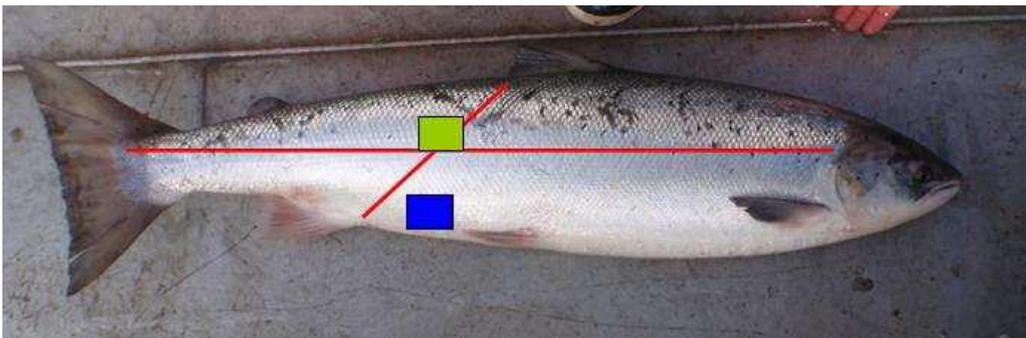
Des tests de détection effectués *in situ* (15 journées de tests) ont permis d'évaluer la capacité d'écoute du système acoustique mis en place. Il a été remarqué que les aires de détection des hydrophones étaient très variables et très sensibles aux conditions environnementales, notamment au débit du fleuve. Elles peuvent varier entre quelques mètres et 1200 m en fonction des sites, des coefficients de marée, du débit journalier etc.

Les sites de détection présentant les performances les plus mauvaises ou les plus variables sont majoritairement situés en amont. Il est fort probable que les particules charriées par la Loire (sable) perturbent significativement la capacité de détection des hydrophones en générant des bruits de fond. Les conditions acoustiques à l'étal étaient toujours optimales. Un hydrophone installé dans un bras de la Loire près d'Avoine (Figure 2) en 2012 n'a d'ailleurs permis aucune détection dans cette zone, sans qu'il puisse toutefois être précisé si cette absence de détection est due à un problème méthodologique ou biologique.

Ainsi, le système acoustique étant « poreux », il est impossible d'affirmer qu'un poisson marqué et non détecté n'a pas emprunté l'estuaire. Cependant, la probabilité qu'un poisson remonte l'ensemble du site équipé sans être détecté est très faible.

## Marquage et relâche des poissons

Le marquage acoustique s'effectue immédiatement après capture dans un bac de 100 L alimenté en eau de la Loire et oxygéné à l'aide d'une pompe. Dans un premier temps, des échantillons de nageoires (nageoire pelvienne) et d'écailles (Figure 7) sont prélevés. Les écailles sont conservées dans une enveloppe pour une future estimation de l'âge du poisson et l'échantillon de tissu de nageoire est placé dans un tube rempli d'alcool à 90 % pour procéder ultérieurement à des analyses génétiques. Le tag acoustique (Annexe 3) est positionné à l'extrémité d'un tube en PVC muni d'un piston puis inséré délicatement par la bouche jusqu'à l'estomac alors que le poisson est maintenu bien droit (Annexe 4). Cette méthode est utilisée car les Saumons ne se nourrissent plus une fois entrés en eau douce. C'est une adaptation de la méthode utilisée par Steinbach et al., 1986 illustrée par Bridger et Booth, 2003. Enfin, un tag TIRIS (Annexe 3) est implanté dans la cavité générale du poisson (Figure 7) en réalisant une petite ouverture superficielle en arrière de la nageoire pelvienne à l'aide d'un petit scalpel courbé préalablement désinfecté à l'alcool puis rincé à l'aide d'une solution saline. Les caractéristiques biométriques (Longueur totale, longueur à la fourche, poids) ainsi que l'état sanitaire du poisson (présence de blessures, état général) sont reportés sur une feuille de terrain. Il faut ensuite procéder à un temps de réoxygénation (variables selon les individus et le temps passé dans le filet) en tenant le poisson par le pédoncule caudale tout en lui faisant effectuer des mouvements de va-et-vient qui permettent l'oxygénation des branchies (Annexe 4). Lorsque le poisson commence à se débattre, il est relâché dans la Loire.



**Figure 7 : Zone de prélèvement d'écailles sur un Saumon atlantique adulte pêché le 20 mars 2012 matérialisée par le rectangle vert. La zone d'implantation du tag TIRIS est matérialisée en bleu**

## Collecte des données de détection

Les données de détections des poissons marqués sont collectées environ une fois par mois pour limiter les risques de perte de données dans l'éventualité où un hydrophone venait à être perdu. La quasi-totalité des données du réseau (de Saint-Nazaire à Oudon) peut être collectée en une journée. Cette opération est réalisée avec l'aide de M. Vallée qui assure le transport en bateau vers les sites comportant des hydrophones. Un ordinateur de terrain est connecté à chaque hydrophone par une liaison Bluetooth afin d'assurer le téléchargement des données. Les sites 7 (St Florent) et 8 (Avoine) sont téléchargés ponctuellement en se rendant directement sur place.

## B. Résultats

### Caractéristiques des individus capturés

Du 23 janvier 2012 au 15 mars 2013, 32 journées de pêches ont été effectuées. Seuls trois individus de *Salmo salar* ont été capturés. Le premier a été capturé le 20 mars 2012, le second a été capturé le 22 mars 2012 et le troisième le 29 mars 2012. Ils ont été respectivement capturés lors de marées de coefficients 75, 91 et 45.

Tableau 1 : Caractéristiques générales des trois Saumons capturés au printemps 2012

Individu	Date capture	Heure capture	Site capture	LT	N° Tag acoustique	N° TIRIS	Remarques
SASA-1000	20/03/2012	15 :00	Paimboeuf-Cordemais	910	232	174309983	Marques de filet sur la tête
SASA-1001	22/03/2012	17 :20	Paimboeuf-Cordemais	715	238	174309977	Marques de filet sur la tête
SASA-1002	29/03/2012	09 :15	Paimboeuf-Cordemais	740	250	165967993	Très bon état général

D'après la lecture d'écaïlle faite par M. J-L. Baglinière et M. F. Marchand de l'INRA de Rennes, le premier Saumon capturé est un Saumon ayant séjourné 3 ans en mer et un an en eau douce, les deux suivants ont passés 2 ans en mer et 2 ans en eau douce.

Les trois individus ont tous été capturés de jour à l'occasion d'une marée haute. Trois Saumons ont été capturés sur une zone peu profonde située hors chenal de navigation entre Cordemais et Paimboeuf.



Figure 8 : Photo de la tête d'un individu capturé en estuaire de Loire, quelques marques de filet sont visibles.

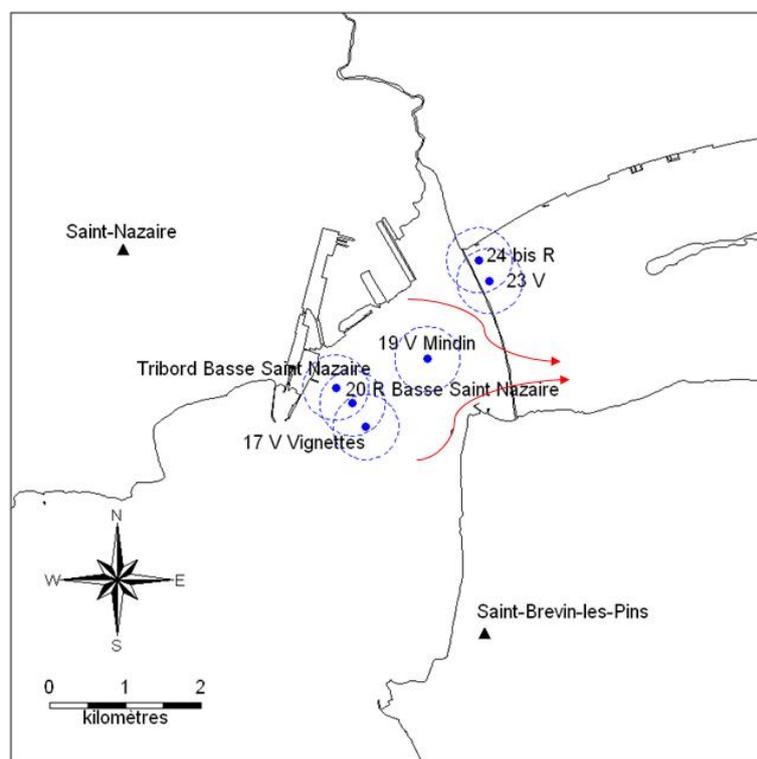


## Retours en mer

Au sein de la première phase, des retours en mer peuvent être soupçonnés chez les 3 Saumons lorsque des périodes d'absence de détections sont enregistrées au niveau des hydrophones les plus en aval (Tableau 2). Néanmoins, il est difficile d'être catégorique quant au réel retour en mer du poisson. En effet, comme évoqué précédemment, le réseau acoustique possède une légère porosité : les poissons ne sont pas systématiquement détectés au niveau des hydrophones. De plus, la rive gauche de l'embouchure n'est pas pourvue d'hydrophones (Figure 10) pour des raisons de contraintes techniques d'installation.

**Tableau 2 : Détections consécutives de Saumons temporellement espacées à l'embouchure de la Loire**

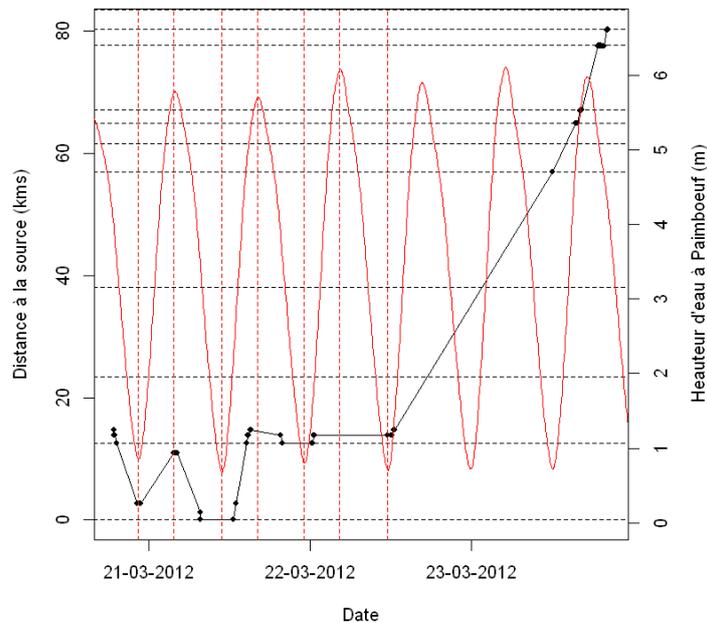
Individu	1 <sup>ère</sup> détection Saint - Nazaire	Bouée 1 <sup>ère</sup> détection	2 <sup>ème</sup> détection Saint- Nazaire	Bouée 2 <sup>ème</sup> détection	Durée	Phase de marée 1 <sup>ère</sup> détection	Phase de marée 2 <sup>ème</sup> détection
SASA-1000	21/03 7 h 42	Tribord Basse	21/03 12 h 34	Tribord Basse	4 h 51 min	Jusant	Flot
SASA-1001	23/03 21 h 30	Tribord Basse	24/03 6 h 34	23 V	9 h 4 min	Jusant	Jusant
SASA-1002	30/03 04 h 26	17 V Vignettes	30/03 05 h 55	Tribord Basse	1 h 29 min	Jusant	Flot
SASA-1002	30/03 7 h 22	24 bis R	30/03 14 h 20	23 V	6 h 58 min	Flot	Jusant
SASA-1002	30/03 16 h 46	17 V Vignettes	30/03 19 h 47	Tribord Basse	3 h 1 min	Jusant	Flot
SASA-1002	30/03 20 h 44	19 V Mindin	31/03 2 h 41	19 V Mindin	5 h 57 min	Flot	Jusant



**Figure 10 : Emplacement des hydrophones à Saint Nazaire. Les cercles en pointillés indiquent les rayons de détection maximaux des hydrophones. Les flèches rouges indiquent d'éventuels trajets non détectables des Saumons.**

### *Lien avec le cycle de marée en aval*

Les mouvements des Saumons sont très clairement liés aux marées pendant leur phase d'attente en aval de Cordemais. La figure 11 représente l'évolution des détections du premier Saumon marqué en 2012 (SASA-1000). Les mouvements du poisson sont très clairement en phase avec le cycle de marée dans la partie aval de l'estuaire (86 % des mouvements des Saumons sont en phase) : des mouvements dirigés vers l'amont se produisent très souvent au flot alors que des mouvements dirigés vers l'aval se produisent davantage au jusant. Une fois la phase de migration initiée, on constate que ce comportement n'est plus présent ou n'est en tout cas plus fréquent. En effet, même si des oscillations en phase avec les marées ont pu se produire après son départ de Paimboeuf, le Saumon SASA-1000 n'est vraisemblablement passé qu'une fois à Cordemais (Pk = 23 kms) et au Pellerin (Pk = 38 kms) car il n'a pas jamais été détecté dans ces stations et est finalement arrivé à Oudon (Pk = 80 kms). Les allers-retours des poissons qui oscillent multiplient leur probabilité d'être détectés au moins une fois. Aucun retour en arrière de poisson n'a été observé après Cordemais. La zone d'attente et d'oscillations en lien avec les marées semble être cantonnée à l'aval de Cordemais même si on ne peut l'affirmer de façon certaine étant donné le faible nombre d'individus. L'initiation de la phase de migration rapide vers l'amont s'est produite au début du flot pour SASA-1000 et SASA-1001 mais s'est produite au début du jusant pour SASA-1002 (Annexe 4).



**Figure 11 : Evolutions des détections de SASA-1000 et de la hauteur d'eau à Paimboeuf dans le temps.**

### *Vitesses de migration*

Les vitesses de migration ont été calculées à partir du moment où les Saumons sont entrés dans la phase de migration rapide, en général après Cordemais. La vitesse de migration moyenne pour les 3 Saumons est de  $44 \text{ km.j}^{-1}$  ( $36 \text{ km.j}^{-1}$  pour SASA-1002,  $46 \text{ km.j}^{-1}$  pour SASA-1001 et  $50 \text{ km.j}^{-1}$  pour SASA-1000).

## **IV. Discussion et perspectives pour la phase 2**

Cette partie vise à tirer des enseignements de la première campagne de pêche menée au printemps 2012 afin d'améliorer les chances de captures de Saumons au cours de la seconde campagne de pêche. Par conséquent, des perspectives d'amélioration seront évoquées à la fois dans le cadre de la fin de la première phase mais également dans une optique de perfectionnement de la seconde phase du projet. D'un point de vue technique, des perspectives d'amélioration de la capacité de détection du réseau acoustique seront également évoquées.

### ***A. Capture des Saumons***

Peu de poissons ont été capturés pendant la première campagne de pêche. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce manque de réussite. Le Saumon est une espèce protégée en Loire depuis longtemps. Les pêcheurs professionnels ne sont donc pas habitués à rechercher spécifiquement ce poisson. D'autre part, les pêches ont cette année commencé trop tardivement à cause des retards administratifs relatifs à l'embauche de l'ingénieur d'études. Enfin, les mauvaises conditions climatiques du mois d'avril 2012 n'ont pas permis de pêcher suffisamment pendant cette période propice. L'expérience de la première campagne de pêche va permettre de suivre quelques voies de perfectionnement qui sont détaillées ci-après.

#### **Zone de pêche**

Les trois Saumons de 2012 ont tous été capturés à marée haute dans des zones situées hors du chenal de navigation. Or, d'après la littérature et le retour sur expérience des pêches de Saumons menées par l'Ifremer sur l'Adour (Bégout Anras, 2001), les Saumons seraient très mobiles à proximité de la marée basse et notamment au début de la marée montante. Pourtant, nous n'avons eu aucun résultat pendant cette période. Le problème peut provenir de la zone de pêche. A marée basse, il était impossible de pêcher sur cette zone hors chenal par manque d'eau. Des essais ont été menés cette année et il sera nécessaire de tenter de pêcher sur ces zones peu profondes également à marée basse car les Saumons passent probablement sur ces zones comme ils le font à marée haute.

#### **Coefficients de marée**

Des recherches bibliographiques confrontées à l'expérience des pêcheurs professionnels et celle de cette année semblent montrer que les Saumons se concentrent dans les estuaires pendant les mortes-eaux. L'eau très turbide pendant les vives-eaux dans les estuaires macrotidaux comme celui de la Loire pourrait être un obstacle à la remontée des poissons. La pêche pendant les mortes-eaux (coefficients < 70) sera privilégiée pour la seconde campagne de pêche.

#### **Effort de pêche**

Le faible effectif de Saumons capturés en 2012 rend indispensable l'augmentation de l'effort de pêche en 2013. Cette augmentation vise à répondre à plusieurs objectifs. D'une part, l'effort de pêche en estuaire aval nécessite d'être augmenté. En effet, l'estimation du nombre d'individus entrant en estuaire de Loire ne sera possible qu'à condition d'avoir un nombre conséquent d'individus marqués en estuaire. Même si des recaptures sont faites plus en amont, il sera impossible

d'obtenir une estimation fiable si peu d'individus ont été capturés en estuaire. Un second pêcheur estuarien pratiquant au filet dérivant permettrait d'augmenter les chances de captures. De plus, il serait intéressant d'impliquer un pêcheur travaillant sur une autre zone de l'estuaire aval légèrement en amont. Ainsi ce second pêcheur pourrait effectuer des recaptures précoces d'individus marqués plus en aval. Un effort de pêche supplémentaire en estuaire aval permettrait donc à la fois d'augmenter les captures en estuaire aval mais également de potentiellement évaluer les pertes en ligne sur le premier secteur séparant les deux pêcheurs.

D'autre part, l'absence de détections des 3 Saumons marqués au printemps 2012 dans les cadres récepteurs de LOGRAMI en amont laisse supposer une mortalité de ces 3 individus avant de parvenir à ces zones. Sous réserve d'avoir un nombre d'individus marqués suffisant en estuaire aval, l'estimation du stock entrant en estuaire de Loire sera impossible si les poissons marqués ne sont pas recapturés. Par conséquent, il serait judicieux d'impliquer des pêcheurs professionnels équipés de lecteurs de tags TIRIS sur des secteurs intermédiaires. Ainsi, ces recaptures précoces permettront d'estimer le stock entrant en estuaire de Loire de manière non biaisée par une éventuelle mortalité au cours de la migration jusqu'aux zones amonts.

## ***B. Marquage***

Une grande conclusion de la première partie de l'étude est la poursuite de la migration pour tous les individus marqués. Aucune mortalité à court ou moyen terme (les individus ont été en moyenne suivis pendant 94,7 h soit environ 4 jours) n'a été observée. Tous les individus ont été suivis jusqu'à la limite de la zone d'écoute. Il y a incontestablement une bonne rétention des tags acoustiques. La technique de marquage utilisée durant la première partie de l'étude sera donc à poursuivre.

## ***C. Comportement des Saumons***

Les graphiques d'activité des Saumons confirment le très fort lien entre leurs mouvements et le rythme tidal. Les Saumons se mettent en mouvement autour des étals de marée haute et basse. L'effort de pêche sera à maintenir le plus longtemps possible autour de ces étals pour maximiser les chances de capturer un poisson en mouvement pendant ces phases d'oscillations.

D'autre part, les vitesses de migration calculées pour les 3 individus marqués lors de la première campagne vont permettre d'améliorer l'efficacité des pêches sur les nouveaux secteurs en amont potentiellement opérationnels pour la seconde phase. En effet, sous réserve que les Saumons maintiennent la même vitesse de migration en amont que celle calculée sur l'axe Cordemais-Oudon, il sera possible d'anticiper les pêches en amont de manière à en augmenter les performances. En tenant compte de cette vitesse, les pêcheurs les plus amonts pourront être informés du moment propice pour aller pêcher après des captures en aval d'autant plus que les Saumons semblent migrer en groupe (Brawn, 1982).

## ***D. Réseau acoustique***

Le réseau acoustique a montré une certaine porosité en 2012. Pour la plupart des stations, le réseau est assez efficace bien que certains poissons ne sont parfois pas détectés. Il est clair que des poissons peuvent échapper à un hydrophone. Les contraintes du terrain n'ont pas permis d'installer les hydrophones suivant des lignes transversales par rapport à l'axe de la Loire partout. C'est pourquoi certains poissons ont pu effectuer des parcours de migration non couverts par les

hydrophones (Figure 10). En revanche, la situation ne se reproduit que rarement. Les 3 poissons ont globalement été très bien suivis par le réseau.

Certains secteurs ont en revanche montré des taux de détections très bas notamment en amont. Les données des Saumons seules ne permettent pas de l'affirmer, mais la mutualisation de ce projet avec celui sur les migrateurs amphihalins (Aloses, lamproies) montre que certaines stations détectent très mal toutes espèces confondues. Il s'agit des 2 stations les plus amont : Varades et Avoine. Plusieurs raisons pourraient expliquer ce phénomène : hydrophones mal positionnés, trop fortes turbulences parasitant l'écoute ... La révision du positionnement des hydrophones et l'installation de nouveaux hydrophones dans ces zones sera donc à envisager. En effet, la station de Varades comptait 2 hydrophones et celle d'Avoine n'en comptait qu'un seul. Un hydrophone supplémentaire par station serait donc tout à fait approprié.

L'absence de « recapture » (par le biais du tag TIRIS) chez les 3 Saumons en 2012 est assez problématique. Comme il a déjà été évoqué dans la partie A, l'estimation du stock entrant en estuaire sera impossible sans recaptures. C'est pourquoi il serait judicieux d'équiper en hydrophones de nouvelles stations vers l'amont. De la même façon que pour l'installation de nouvelles zones de pêche en amont, l'installation de nouvelles stations d'écoute poursuivrait 2 objectifs : à la fois permettre d'effectuer des recaptures précoces (sous la forme de détections) pour pouvoir estimer le stock entrant, mais également de pouvoir caractériser les pertes en ligne sur une plus longue distance.



Figure 12 : Bilan de la campagne de pêche 2012 et perspectives d'amélioration pour la fin du projet et le début de la seconde phase.

## V. Bibliographie

- Aarestrup, K., E. B. Thorstad, et al. (2010). "Survival and progression rates of large European silver eel *Anguilla anguilla* in late freshwater and early marine phases." *Aquatic Biology* **9**(3): 263-270.
- Abril, G., H. Etcheber, et al. (1999). "Oxic/anoxic oscillations and organic carbon mineralization in an estuarine maximum turbidity zone (The Gironde, France)." *Limnology and Oceanography* **44**(5): 1304-1315.
- Alabaster, J. S. (1970). "River flow and upstream movement and catch of migratory salmonids." *Journal of Fish Biology* **2**(1): 1-&.
- Alabaster, J. S. (1990). "The temperature requirements of adult atlantic salmon, *Salmo salar* L, during their upstream migration in the river Dee." *Journal of Fish Biology* **37**(4): 659-661.
- Aprahamian, M. W., G. O. Jones, et al. (1998). "Movement of adult Atlantic salmon in the Usk estuary, Wales." *Journal of Fish Biology* **53**(1): 221-225.
- Bach, J. M., T. Parouty, et al. (2012). Recueil de données biologiques 2011, LOGRAMI: 312.
- Banks, J. W. (1969). "A review of literature on upstream migration of adult salmonids." *Journal of Fish Biology* **1**(2): 85-&.
- Bégout Anras, M. L. (2001). Etude des particularités du comportement individuel des Saumons lors de leur migration estivale dans l'estuaire de l'Adour, CREMA L'Houmeau: 36.
- Bernard, D. R., J. J. Hasbrouck, et al. (1999). "Handling-induced delay and downstream movement of adult chinook salmon in rivers." *Fisheries Research* **44**(1): 37-46.
- Brawn, V. M. (1982). "Behavior of atlantic salmon (*Salmo salar*) during suspended migration in an estuary, Sheet harbor, Nova Scotia, observed visually and by ultrasonic tracking." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **39**(2): 248-256.
- Bridger, C. and R. Booth (2003). "The effects of biotelemetry transmitter presence and attachment procedures on fish physiology and behavior." *Reviews in Fisheries Science* **11**(1): 13-34.
- Connors, K. B., D. Scruton, et al. (2002). "The effects of surgically-implanted dummy radio transmitters on the behaviour of wild Atlantic salmon smolts." *Hydrobiologia* **483**(1-3): 231-237.
- Erkinaro, J., F. Okland, et al. (1999). "Return migration of Atlantic salmon in the River Tana: the role of environmental factors." *Journal of Fish Biology* **55**(3): 506-516.

- Etcheber, H., A. Taillez, et al. (2007). "Particulate organic carbon in the estuarine turbidity maxima of the Gironde, Loire and Seine estuaries: origin and lability." Hydrobiologia **588**(1): 245-259.
- Fried, S. M., J. D. McCleave, et al. (1976). "Buoyancy Compensation by Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Smolts Tagged Internally with Dummy Telemetry Transmitters." Journal of the Fisheries Research Board of Canada **33**(6): 1377-1380.
- Gadais, R. (2011) « Etude par télémétrie hydroacoustique du comportement migratoire de la grande Alose dans l'estuaire de la Loire ». Rapport de stage de Master 1 Ingénierie des Milieux Aquatiques et des COrridors Fluviaux, Tours. 1-58.
- GIP Loire Estuaire, (2012). « L'eau support de vie : L'oxygène de l'eau ». Cahier indicateurs n°1. Juillet 2012. GIP Loire Estuaire.
- Hasler, A. D. (1966). Underwater guideposts: homing of salmon, University of Wisconsin Press.
- Hawkins, A. D., G. G. Urquhart, et al. (1979). "The coastal movements of returning Atlantic salmon, *Salmo salar* L." Scottish Fisheries Research Report **15**: 14.
- Hayes, F. R. (1953). Artificial freshets and other factors controlling the ascent and population of Atlantic salmon in the La Have River, Nova Scotia. Ottawa, Fisheries Research Board of Canada.
- Heupel, M. R., J. M. Semmens, et al. (2006). "Automated acoustic tracking of aquatic animals: scales, design and deployment of listening station arrays." Marine and Freshwater Research **57**(1): 1-13.
- Ifremer. (2011). "Les filets maillants." Consultée le 11/03/2013, from <http://wwz.ifremer.fr/peche/Le-monde-de-la-peche/La-peche/comment/Les-engins/Filet-maillant>.
- Jackson, P. A. and D. I. D. Howie (1967). "The movement of salmon (*Salmo salar*) through an estuary and a fish-pass." Irish Fisheries Investigations Series A (Freshwater): 28.
- Jensen, A. J., T. G. Heggberget, et al. (1986). "Upstream migration of adult atlantic salmon, *Salmo salar* L, in the river Vefsna, northern Norway." Journal of Fish Biology **29**(4): 459-465.
- Lasne, E., C. Rigaud, et al. (2011). Compte-rendu du premier séminaire GRISAM sur la thématique " Poissons migrateurs amphihalins et milieux marins". Dinard, CRESCO: 33.
- Lassalle, G. and E. Rochard (2008). "Impact of twenty- first century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East." Global Change Biology **15**(5): 1072-1089.

- Laughton, R. (1991). The movements of adult Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the river Spey as determined by radio telemetry during 1988 and 1989. Aberdeen, The Scottish Office Agriculture and Fisheries Department.
- Lilja, J. and A. Romakkaniemi (2003). "Early-season river entry of adult Atlantic salmon: its dependency on environmental factors." Journal of Fish Biology **62**(1): 41-50.
- Limburg, K. E. and J. R. Waldman (2009). "Dramatic Declines in North Atlantic Diadromous Fishes." Bioscience **59**(11): 955-965.
- Mills, D. (1989). Ecology and Management of Atlantic Salmon. London.
- Nordqvist, O. (1924). "Times of entering of the Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the rivers." Conseil Permanent International pour L'exploration de la Mer. Rapports et Procès Verbaux XXXIII.
- Olson, A. F. and T. P. Quinn (1993). "Vertical and horizontal movements of adult chinook salmon *Oncorhynchus tshawytscha* in the Columbia river estuary." Fishery Bulletin **91**(1): 171-178.
- Potter, E. C. E. (1988). "Movements of atlantic salmon, *Salmo salar* L, in an estuary in south-west England." Journal of Fish Biology **33**: 153-159.
- Priede, I. (1991). "Telemetry in assessment of environmental effects on individual fishes." University of Aberdeen, Department of zoology.
- Priede, I. G., J. Solbe, et al. (1988). "Behavior of adult atlantic salmon, *Salmo salar* L, in the estuary of the river ribble in relation to variations in dissolved oxygen and tidal flow." Journal of Fish Biology **33**: 133-139.
- Rivinoja, P., K. Leonardsson, et al. (2006). "Migration success and migration time of gastrically radio-tagged v. PIT-tagged adult Atlantic salmon." Journal of Fish Biology **69**(1): 304-311.
- Smith, G. W., R. N. B. Campbell, et al. (1998). "Regurgitation rates of intragastric transmitters by adult Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) during riverine migration." Hydrobiologia **372**: 117-121.
- Smith, I. P. and G. W. Smith (1997). "Tidal and diel timing of river entry by adult Atlantic salmon returning to the Aberdeenshire Dee, Scotland." Journal of Fish Biology **50**(3): 463-474.
- Solomon, D. J. and E. C. E. Potter (1988). "1st results with a new estuarine fish tracking system." Journal of Fish Biology **33**: 127-132.
- Stasko, A. B. (1975). "Progress of migrating atlantic salmon (*Salmo salar*) along an estuary, observed by ultrasonic tracking." Journal of Fish Biology **7**(3): 329-338.

- Stasko, A. B. and D. G. Pincock (1977). "Review of underwater biotelemetry, with emphasis on ultrasonic techniques." Journal of the Fisheries Research Board of Canada **34**(9): 1261-1285.
- Steinbach, P., P. Gueneau, et al. (1986). "Radio-pistage de grandes Aloses adultes en Loire." Bull. Fr. Pêche Piscic.(302): 106-117.
- Team Coho, R. (1998). "Coho salmon final report." Fisheries and Oceans Canada, Pacific Region, Vancouver.
- Thorstad, E. B., F. Okland, et al. (2000). "A system for automatic recording of fish tagged with coded acoustic transmitters." Fisheries Management and Ecology **7**(4): 281-294.
- Thouvenin, B., P. Le Hir, et al. (1994). "Dissolved oxygen model in the Loire Estuary." Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark: 169-178.
- Trepanier, S., M. A. Rodriguez, et al. (1996). "Spawning migrations in landlocked Atlantic salmon: Time series modelling of river discharge and water temperature effects." Journal of Fish Biology **48**(5): 925-936.
- Valadou (2008) « Plan français de mise en oeuvre des recommandations de l'OCSAN en matière de protection, de gestion et de mise en valeur du saumon atlantique et de son habitat » 1-23

# Annexes

## Annexe 1 : Réseau d'hydrophones opérationnel en Loire en 2012

Lieu	Numéro de bouée ou ponton	Latitude (WGS 84)	Longitude (WGS 84)
Avoine	Corps mort	47,23719	0,19103
montrelais	Guideau Y.Perraud	47,37907878	-0,96049362
St florent	Corps mort	47,36459104	-1,01183347
Amont Patache	114 R	47,34347	-1,254
Amont Patache	99V	47,34227	-1,25107
Oudon	85 V	47,34022	-1,29455
Oudon	90 R	47,34115	-1,2926
Aval Oudon	72 R	47,3278	-1,3257
Aval Oudon	71 V	47,3278	-1,32228
Aval Oudon	74 R	47,32935	-1,32192
Thouaré	31 V	47,26247	-1,42225
Thouaré	46 R	47,26403	-1,42157
Boire-Courant	25 V	47,24575	-1,43885
Boire-Courant	38 R	47,24713	-1,43838
Bellevue	18 R	47,23335	-1,47187
Bellevue	13 V	47,23222	-1,47123
Nantes bras Sud	2 R	47,20877	-1,52168
Nantes bras Nord	Ponton CR	47,21233	-1,52568
Pellerin	50R	47,20572	-1,7579
Pellerin	Station GIP Pellerin	47,20383	-1,75759
Cordemais	33 V	47,27777	-1,90512
Cordemais	40 R	47,27867	-1,89917
Paimboeuf	26 R	47,3028	-2,05868
Paimboeuf	29 bis V	47,29875	-2,04523
Paimboeuf	28 R	47,30118	-2,04425
Paimboeuf	31 V	47,2942	-2,02758
Paimboeuf	30 R	47,29393	-2,01663
Paimboeuf	27 V - Donges Sud	47,3007	-2,06407
St Nazaire	24 bis R	47,28713	-2,1702
St Nazaire	23 V	47,28472	-2,16813
St Nazaire	17 V - Vignettes	47,26625	-2,1881
St Nazaire	19 V - Mindin	47,27488	-2,17812
St Nazaire	Tribord Basse Nazaire	47,27075	-2,19382
St Nazaire	20 R Basse Nazaire	47,269	-2,19073

## Annexe 2 : Action de pêche au filet dérivant en estuaire de Loire aval



*Filet dérivant en action de pêche entre Cordemais et Paimboeuf*



*Opération de virage du filet dérivant en fin de pêche.*

### Annexe 3 : Marques et récepteur utilisés



*Marque acoustique active MP-13 (à gauche) et Marque passive TIRIS (à droite)*



*Hydrophone VR2W-69 kHz (source : VEMCO, <http://www.vemco.com/products/receivers/vr2w.php>)*



*Ensemble constitué d'un bout terminé par un lest sur lequel est fixé l'hydrophone. Cet ensemble est fixé à une bouée de navigation, une bouée installée sur un corps mort ou un ponton.*

## Annexe 4 : Photos illustrant le protocole de marquage des Saumons



*Individu de Saumon atlantique en récupération avant l'étape de marquage intra-stomacal*



*Marquage acoustique d'un Saumon atlantique par marquage intra-stomacal*



*Réoxygénation du poisson avant remise à l'eau*

