HAL
open science

Etude de l'origine natale et de l'histoire de vie de la truite fario (Salmo trutta fario) du bassin de la Garonne amont par isotopie du Strontium (87Sr :86Sr) des otolithes.

Gilles Bareille, Loïc Baumann, Alexandre Holub, Hélène Tabouret, Christophe Pécheyran, Sylvain Bérail

To cite this version:

Gilles Bareille, Loïc Baumann, Alexandre Holub, Hélène Tabouret, Christophe Pécheyran, et al.. Etude de l'origine natale et de l'histoire de vie de la truite fario (Salmo trutta fario) du bassin de la Garonne amont par isotopie du Strontium (87Sr :86Sr) des otolithes.. [Rapport de recherche] Universite de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, MIRA, Pau, France. 2017. hal-03640136

HAL Id: hal-03640136

https://univ-pau.hal.science/hal-03640136v1

Submitted on 13 Apr 2022

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.

Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux (IPREM) – UMR CNRS/UPPA 5254.
Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)
Hélioparc Pau Pyrénées, 2 avenue du Président Pierre Angot - 64053 PAU Cedex 9
Tél : 05 40 17 50 00 – Fax : 05 40 17 50 07

Etude de l'origine natale et de l'histoire de vie de la truite fario (Salmo trutta fario) du bassin de la Garonne amont par isotopie du Strontium (^{87}Sr :^{86}Sr) des otolithes

Rédacteurs : **L. Baumann, G. Bareille**
(05.59.40.77.61 ; gilles.bareille@univ-pau.fr)
Participants à l'étude : H. Tabouret, A. Holub, C. Pécheyran, S. Bérail.

Novembre 2017

Sommaire

Introduction 1

Matériel et Méthodes 8

1. Site de l'étude 8

2. Echantillonnages 8

a. Eau 8

b. Truites fario 9

3. Extraction et préparation des otolithes 11

4. Analyses de l'isotopie du Strontium 12

a. Principe et fonctionnement : le MC-ICP-MS 12

b. Mesure du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr de l'eau 12

c. Mesure du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des otolithes par LA-MC-ICP-MS 13

5. Analyse statistique 13

Résultats 15

1. Rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des eaux. 15

2. Identification de l'origine natale sauvage ou pisciculture des truites fario et du stade de déversement 17

3 Détermination de l'histoire de vie des truites fario : déplacements ? 22

3.1 - Secteur A : Garonne amont et affluents (hors bassin de la Pique) 22

3.2 - Secteur B : Pique et affluents (hors bassin du Lys) 26

3.3 - Secteur C : bassin du Lys. 32

Discussion 42

Conclusion 48

Introduction

Contexte général

La vie d'un organisme dépend en grande partie de sa capacité à accéder aux habitats qui lui sont favorables sur l'ensemble des phases de son cycle. Pour de nombreuses espèces telles que les espèces migratrices, qui nécessitent différents habitats au cours de leur développement, l'espérance de vie des individus est donc fortement liée à leur capacité à relier ces différents milieux (Barnett-Johnson et al, 2010 ; Runge et al, 2014). Or depuis plusieurs décennies, les écosystèmes aquatiques continentaux et leurs communautés sont fortement impactés dans le monde entier par la surexploitation (pêche), la pollution des eaux, la dégradation ou la destruction des habitats, l'invasion d'espèces exotiques, la modification de l'hydrologie, ou encore par le changement climatique (Dudgeon et al, 2006 ; Wilcove & Wikelski, 2008). Ceci se traduit par une perte importante de biodiversité dulçaquicole (Dudgeon et al, 2006). Ces problématiques concernent notamment les espèces de poissons amphihalins (McDowall, 1999) et continentaux, dont les mouvements de populations souvent peu compris (McDowall, 1999 ; Hegg et al, 2015), dépendent fortement de la qualité des milieux aquatiques et de la connectivité inter-habitats.

En écologie, il est donc particulièrement intéressant d'identifier et de caractériser les habitats favorables à la croissance, la survie et la reproduction des espèces menacées et/ou ciblées par les pêcheries (Barnett-Johnson et al, 2010), et d'évaluer la connectivité entre ces habitats (Webster et al, 2002). Il est également nécessaire d'intégrer la compréhension des mouvements et de l'histoire de vie des poissons de rivière au regard des pratiques de restauration, de conservation et de gestion des populations natives et des écosystèmes lotiques (Muhlfeld et al, 2012 ; Wolff et al, 2012). L'identification des origines natales, par exemple, permet d'évaluer l'état de populations en déclin et l'effet de programmes d'alevinage. Cependant, il est souvent complexe d'identifier l'origine natale des individus au sein d'aires géographiques où les populations sont susceptibles de se mélanger (Barnett-Johnson et al, 2008). Ces questions ont ainsi motivé la recherche de marqueurs de populations « idéaux » pour des applications en écologie (Ward & Grewe, 1994 ; Barnett-Johnson et al, 2008).

Un outil pour identifier des origines et évaluer la connectivité: la microchimie des otolithes

Les otolithes, ou « pierres d'oreilles », sont des structures minéralisées acellulaires (Campana & Neilson, 1985) incluses dans l'oreille interne des poissons téléostéens et jouant un rôle primordial dans les processus de l'équilibre et de l'audition (Popper et al, 2005). Ce sont les premières pièces calcifiées à se développer chez ces organismes, et ce dès le début de l'ontogenèse (Campana & Neilson, 1985). Les otolithes grandissent ensuite tout au long de la vie des poissons par le dépôt journalier de carbonate de Calcium à ~95% (principalement sous forme d'aragonite) et de couches protéiques à ~5% (Campana & Thorrold, 2001 ; Bacon et al, 2004 ; Hobson et al, 2010), à partir d'une structure centrale appelée primordium (Campana & Neilson, 1985 ; Martin, 2013).

Une de leurs particularités est qu'ils incorporent dans leurs couches journalières divers éléments chimiques dont l'origine est associée à leur milieu de vie (via la respiration branchiale) et à leur régime alimentaire, certains s'accumulant dans l'otolithe en relation avec la composition du milieu de vie, alors que pour d'autres, l'influence du métabolisme est fortement suspectée (Campana & Thorrold, 2001). Par ailleurs, comme les otolithes sont métaboliquement inertes (Hobson et al, 2010) et ne sont pas sujets à la résorption (Campana & Thorrold, 2001), les cercles d'aragonite ne sont pas altérés après leur dépôt et peuvent donc être référencés à des âges spécifiques : aussi l'information « prélevée » au niveau de différentes zones d'un otolithe peut permettre de reconstruire les événements marquants de l'ensemble de la vie d'un poisson (Campana & Thorrold, 2001 ; Kennedy et al, 2002), comme l'éclosion, la résorption du sac vitellin, le stress ou encore les changements d'habitats (Martin, 2013). C'est pourquoi les otolithes sont souvent assimilés à des « boîtes noires » pour les poissons téléostéens. En effet, si des poissons se développent dans des eaux chimiquement différentes, leurs otolithes vont enregistrer des signatures uniques (en particulier pour les éléments incorporés en relation directe avec la composition chimique du milieu), représentatives de ces habitats, et enregistreront les mouvements éventuels des individus entre des habitats distincts tout au long de leur vie (Walther et al, 2008).

Cet outil peut donc permettre de différencier des poissons provenant de plusieurs régions (Kennedy et al, 2000), de retracer des mouvements migratoires (Bacon et al, 2004 ; Brennan et al, 2015a), ou au contraire d'identifier des résidences dans un milieu spécifique (Walther & Limburg, 2012). Il est même possible d'identifier l'origine natale des poissons par la microchimie de la région centrale de leurs otolithes, et de distinguer, par exemple, des poissons

alevinés de poissons sauvages, même s'ils ont vécu dans un milieu avec une chimie environnementale similaire pendant une partie de leur vie (Zitek et al, 2010). Cette information chimique naturelle peut donc remplacer les marqueurs artificiels pour répondre à de nombreuses questions de gestion des pêcheries, ou pour évaluer le succès de programmes de réintroduction (Zitek et al, 2010).

Alors que les analyses des éléments mineurs et des éléments trace des tissus calcifiés ont dominé les recherches consacrées aux otolithes ces dernières décennies, plusieurs études ont récemment mis en lumière les intérêts apportés par les isotopes stables (Walther & Limburg, 2012), et en particulier les isotopes 86 et 87 du Strontium (Sr). Si le ^{86}Sr est stable, le ^{87}Sr, en revanche, est produit par la désintégration radioactive du Rubidium ^{87}Rb (Bacon et al, 2004 ; Barnett-Johnson et al, 2008). En conséquence, les proportions relatives de ces deux isotopes varient dans la nature, et les roches les plus anciennes ou celles présentant de plus fortes concentrations de ^{87}Rb se caractérisent par de plus hauts rapports ^{87}Sr:^{86}Sr (Barnett-Johnson et al, 2008). Ainsi, le Strontium dissous dans les eaux de surface des rivières a une composition isotopique caractéristique de la géologie de l'ensemble du bassin versant contribuant au site d'échantillonnage, car elle intègre toutes les sources d'eau en amont (Bacon et al, 2004). L'hétérogénéité du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr dans l'eau en relation avec l'hétérogénéité des environnements géologiques constitue donc un outil de choix pour l'étude de provenances et de mouvements de poissons dulçaquicoles (Brennan et al, 2015b). Le Strontium présente des avantages considérables pour ce type d'étude : il remplace facilement le Calcium dans les otolithes (Campana & Thorrold, 2001), et sa signature isotopique y est rapidement incorporée, même durant les premiers stades de vie (Kennedy et al, 2000). Le Strontium ne subit pas de fractionnement biologique significatif (Barnett-Johnson et al, 2008 ; Walther et al, 2011 ; Walther & Limburg, 2012 ; Hegg et al, 2015), ce qui signifie que le ratio ^{87}Sr: ^{86}Sr enregistré par les otolithes correspond fidèlement à celui de l'eau dans laquelle vit le poisson (Kennedy et al, 2000, 2002 ; Walther et al, 2008, 2011 ; Barnett-Johnson et al, 2008 ; Hobson et al, 2010 ; Muhlfeld et al, 2012 ; Walther & Limburg, 2012 ; Brennan et al, 2015b) ; il constitue donc un signal géochimique précis du stock d'origine (Loewen et al, 2015). C'est pourquoi l'étude de l'isotopie du Strontium apparaît aujourd'hui comme l'une des méthodes les plus pertinentes pour répondre à de nombreuses questions relatives à la gestion d'espèces de poissons en milieu continental (Bacon et al, 2004 ; Walther et al, 2008).

Toutefois, une considération importante dans l'analyse de la chimie des otolithes pour de telles questions est le degré de variation temporelle des paramètres chimiques mesurés (Crook

et al, 2013). En effet, si le rapport isotopique change selon les saisons ou selon les années sur un même cours d'eau, il peut y avoir des recouvrements de signatures entre cours d'eau à certains moments. La détermination de l'origine natale d'un individu peut alors s'avérer très délicate. Idéalement, les traceurs doivent donc varier spatialement (entre différentes rivières par exemple), mais rester stables ou varier peu dans le temps pour une rivière donnée (Walther & Limburg, 2012). Selon certains auteurs, le rapport isotopique ^{87}Sr: ^{86}Sr des eaux de rivières pourrait varier sur une échelle saisonnière et interannuelle en fonction de l'amplitude et de la durée des précipitations, et selon l'amplitude des variations de débits entre les périodes de crues et d'étiage (Muhlfeld et al, 2012 ; Walther & Limburg, 2012). Si certaines études (ex. Crook et al, 2013) ont révélé l'existence d'une variabilité temporelle significative pour le rapport ^{87}Sr:^{86}Sr de l'eau au sein d'un bassin versant, et ont donc nécessité l'intégration d'autres traceurs chimiques, selon d'autres auteurs, les isotopes du Strontium resteraient relativement stables entre saisons et entre années (ex. Kennedy et al, 2000). Récemment, Brennan et al (2015b) ont montré, par une étude de l'isotopie du Strontium sur des otolithes de poissons non migrateurs, que les processus dynamiques induisant une variabilité temporelle seraient dépendants du site d'échantillonnage et du système géologique sous-jacent, et donc difficiles à prévoir avec précision. Il est donc préférable de vérifier pour un bassin hydrographique donné, premièrement qu'un contraste suffisant existe entre les rivières de ce bassin pour le rapport isotopique ^{87}Sr: ^{86}Sr et deuxièmement, que les variations saisonnières et inter-annuelle de chacune de ces rivières n'engendrent pas de recouvrement entre rivières.

Malgré ces incertitudes, l'utilisation des isotopes du Strontium en tant que traceurs pour les poissons de rivières peut être vue comme une méthode informative et pertinente sous réserve d'avoir vérifié son utilisation pour un bassin donné. Kennedy et al (1997) ont été les premiers à démontrer le potentiel de l'utilisation du rapport isotopique ^{87}Sr:^{86}Sr en évaluant les contributions relatives de 10 cours d'eau tributaires du fleuve Connecticut (Vermont, USA) pour une population de saumon Atlantique (Salmo salar). Leur travail a montré que les eaux de la majorité de ces rivières différaient significativement par leurs signatures de ^{87}Sr:^{86}Sr, en liaison avec les variations géologiques du bassin. Ce travail a motivé l'utilisation du ratio ^{87}Sr:^{86}Sr des otolithes dans le traçage d'espèces de poissons amphihalins ou potamodromes dans différents systèmes (ex. Hobson et al, 2010 ; Brennan et al, 2015a). Certaines études ayant intégré plusieurs marqueurs élémentaires et/ou isotopiques ont souligné par ailleurs la fiabilité et le fort pouvoir discriminant du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr (ex. Martin et al, 2013 ; Zimmermann et al, 2013), notamment pour la détermination des origines natales des individus. En effet, grâce aux

méthodes d'analyses chimiques actuelles, les mesures de rapports isotopiques sont plus précises (Balcaen et al, 2010) et peuvent être réalisées sur des zones restreintes des otolithes, correspondant à des stades de vie spécifiques (Olley et al, 2011).

Ecologie de la truite fario

Les salmonidés sont considérés comme de bons modèles biologiques pour tester des prédictions en écologie évolutive telle que l'évolution de la migration (Kinnison et al, 2003), et certaines espèces sont particulièrement intéressantes de par le polymorphisme de leurs stratégies de vie et de leur comportement migratoire. Chez ces espèces, une même population peut se scinder en individus migrateurs et sédentaires (ou « résidents ») : on parle alors de migration partielle. C'est le cas de la truite commune Salmo trutta : cette espèce présente une grande plasticité comportementale, et les formes résidentes et migratrices coexistent souvent au sein d'une même population (Kallio-Nyberg et al, 2010). Les populations de truite commune peuvent donc compter à la fois des individus anadromes, qui migrent en mer, et des individus qui passent l'ensemble de leur vie en eau douce, même si parmi ces derniers certains sont relativement mobiles au sein de l'hydrosystème (Cucherousset et al, 2005). Ce polymorphisme est un exemple de plasticité phénotypique influencée à la fois par la génétique et l'environnement (Jonsson & Jonsson, 1993 in Cucherousset et al, 2005 ; Klemesten et al, 2003), et cette plasticité fait de Salmo trutta une des espèces de salmonidés les plus adaptées d'un point de vue écologique (Jonsson & Jonsson, 2009).

Toutefois, malgré son aire de répartition mondiale (Klemetsen et al. 2003 ; Jonsson & Jonsson, 2009), la sauvegarde de l'écotype « sédentaire » est particulièrement impactée par les activités humaines et le changement climatique (Bret, 2016). Les ouvrages hydro-électriques, notamment, sont implantés dans 80% des cas sur des cours d'eau d'altitude, ce qui limite les déplacements et l'accès vers les zones de reproduction les plus favorables dans les têtes de bassins et altère la fonctionnalité de l'hydrosystème. D'autre part, l'occurrence de plus en plus fréquente d'évènements extrêmes comme des crues torrentielles, ou à l'opposé des épisodes de sécheresse prolongée, mettent en danger de tels organismes (Jonsson & Jonsson, 2009). Salmo trutta n'est cependant considérée comme une espèce protégée ni au niveau européen ni en France (Bret, 2016). Etant donnée la nature plastique de l'histoire de vie de la truite commune, il est donc crucial d'identifier les sites utilisés pour le frai et la croissance des juvéniles, ainsi que les patrons de mouvements des juvéniles et des adultes à l'échelle d'un bassin versant pour

permettre la mise en place d'actions de gestion de pêcheries pertinentes et efficaces à l'échelle locale (Olley et al, 2011).

Contexte de la truite fario dans le bassin Garonne amont

La partie amont de l'axe de la Garonne voit ses effectifs de truites communes diminuer depuis de nombreuses années. Sous la conduite de la fédération départementale de pêche de Haute-Garonne (FDP31), l'espèce fait donc l'objet d'un programme de soutien au stock relativement intensif, basé sur la réintroduction d'individus issus de l'alevinage dans l'axe Garonne et dans la Pique.

Au printemps 2013 (mars-mai), quelques truites fario pêchées à la ligne dans la Pique et ces affluents (Lys, les Neste d'Ôo et d'Oueil, Ône) ont été sacrifiées afin de réaliser une étude prospective des otolithes sous l'impulsion de l'Association Agréée de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques (AAPPMA) de Bagnères de Luchon et de la FDP31. Le but était d'évaluer le potentiel informatif du rapport isotopique ^{87}Sr : ^{86}Sr dans les otolithes de truites fario dans cet affluent de la Garonne amont. Ce travail a montré que ce rapport isotopique avait du potentiel pour aborder les questions d'efficacité du programme d'alevinage et de connectivité entre rivières. Grâce à la diversité et la variabilité temporelle des profils isotopiques (^{87}Sr:^{86}Sr), il semble en effet possible de discriminer les individus échantillonnés dans ce bassin selon leur origine natale (truites nées de reproduction naturelle de celles nés à la pisciculture de Soueich), de distinguer quatre grandes entités hydrogéochimiques stables sur plusieurs années (Neste d'Oueil ; Lys amont; Pique amont/Lys aval ; Neste d'Ôo/Ône), et enfin de révéler des déplacements entre ces entités (Pique/Ône ; Lys amont/Lys aval). Une variabilité cyclique originale du ^{87}Sr:^{86}Sr a été mise à jour sur la partie court-circuité du bassin versant du Lys (Lys à l'aval du barrage de l'Ourson), dont l'origine pourrait être en partie liée aux activités hydro-électriques (données non publiées LCABIE – IPREM, Bareille, 2013). Il est à noter que, contrairement aux espèces strictement amphihalines, peu de travaux consacrés à la microchimie des otolithes se sont basés sur des modèles « migrateurs » pouvant être exclusivement dulçaquicoles, d'autant plus au sein de milieux fortement anthropisés. Par ailleurs, à ce jour, très peu d'études dédiées à la compréhension des mouvements de poissons ont intégré la question de l'influence des tributaires du cours d'eau d'intérêt (mais voir Muhlfeld et al, 2012).

En juin 2013, le bassin de la Garonne amont et ses affluents ont subi les effets dévastateurs d'une crue de type centennale, crue qui a fortement impacté les ressources piscicoles du secteur,

en particulier les populations de truite fario. Les effectifs de juvéniles 0+ à l'automne 2013 ont été très mauvais dans l'axe Garonne et son affluent la Pique, témoignant d'une réduction drastique des cohortes précédant la crue de juin 2013. Ces deux axes ont donc fait l'objet de déversement important de truites fario (stade œuf, alevins de printemps et d'automne, truitelles portion) post-crue dans l'espoir de reconstituer les stocks. Sur la base des inventaires de juvéniles 0+ de truite fario, la Pique à l'aval de Bagnères de Luchon semble voir se reconstituer un stock de truite assez rapidement, ce qui n'est pas le cas de la Garonne. Cependant, il n'était pas possible de savoir quelle était la part de la contribution de la reproduction naturelle et de l'alevinage dans la résilience des populations de truites. D'autre part, pourquoi autant de différences entre axe Garonne et Pique aval, deux secteurs soumis à d'importantes éclusées et biologiquement peu favorables à la reproduction.

Aussi, au vu des résultats préliminaires obtenus sur les otolithes de truites fario avant-crue, la FDP31 et l'AAPPMA de Bagnères de Luchon ont donc souhaité étendre ces prospections aux axes de la Garonne amont et de la Pique aval avec pour objectifs d'aborder les deux questions suivantes :

1) Retrouve-t-on des truites issues de l'alevinage dans les deux secteurs? Cet axe de travail visera notamment à estimer le succès des campagnes de déversements de truites d'élevage, dans ces secteurs perturbés où la connectivité interhabitats est altérée.
2) Quel rôle jouent les principaux affluents de la Garonne dans la zone d'étude (i.e. la Pique, l'Ourse, la Neste d'Aure, le Job et le Ger), ainsi que les affluents amont de la Pique (i.e. le Lys, la Neste d'Oô, la Neste d'Oueil) et les affluents du Lys dans les effectifs des populations de truites fario rencontrées respectivement dans les axes perturbés Garonne, Pique aval et Lys ?

Il est à noter que des prélèvements ont été également réalisés pour analyses génétiques. Les deux approches seront confrontées ultérieurement afin d'évaluer leur complémentarité.

Matériel et Méthodes

1. Site de l'étude

La Garonne draine une surface de 52 000 km² dans le Sud-ouest de la France, couvrant le bassin triangulaire de l'Aquitaine, bordé par le Massif Central, les Pyrénées et l'Océan Atlantique. La zone d'étude a été découpée trois entités hydrographiques : (A) le tronçon Garonne amont d'environ 110 km entre le barrage de Plan d'Arem et la commune de Saint-Martory, ainsi que ses affluents l'Ourse, la Neste d'Aure et le Ger ; (B) la Pique, entre sa confluence avec le Lys et celle avec la Garonne, et certains de ses affluents (la Neste d'Oueil, la Neste d'Oô, l'One, le ruisseau de Bourgs) ; (C) le Lys et certains de ses ruisseaux tributaires. Les cours d'eau de ce secteur sont connus pour abriter des populations sauvages de truites fario. Par ailleurs, les bassins de la Garonne et de la Pique (secteurs A et B) bénéficient depuis plus de 40 ans d'une réintroduction de truites issues exclusivement de la pisciculture de Soueich à différents stades de développement (œufs, juvéniles et adultes) (Fédération de Pêche 31). Les rivières d'étude et le site d'alevinage sont représentés en Figure 1.

2. Echantillonnages

a. Eau

Le rapport ^{87}Sr:^{86}Sr de l'eau a été mesuré au niveau de 39 stations réparties sur 15 cours d'eau et trois lacs de montagne alimentant le système. Les échantillons d'eau de surface ont été prélevés au cours de campagnes réalisées en Automne 2016 et aux Printemps 2016. A chaque station, 100 mL d'eau de surface ont été filtrés sur le terrain (filtres PVDF, 0,45 µm), acidifiés à l'acide nitrique ultra-propre (JT Baker, Ultrex II) (2%), et stockés dans des bouteilles de polyéthylène basse-densité (LPDE) avant analyse. Les stations d'échantillonnage de l'eau sont représentées sur la Figure 1.

b. Truites fario

Les truites fario (N = 133) ont été prélevées par pêche électrique entre septembre et octobre 2016 dans les secteurs Garonne amont (N=45) et dans la Pique aval (N=40), ou par pêche à la ligne au Printemps 2016 sur le bassin du Lys (N=33), la Pique amont (N=5) et le ruisseau de Juzet (affluent aval de la Pique, N=4), ainsi que la Garonne en amont de la confluence avec la Pique (Site d'Arlos, N=6).

Les truites échantillonnées mesuraient de 10 à 39 cm et étaient majoritairement dans leur troisième ou quatrième cycle de vie (2+ ou 3+).

Dans la Pique, 40 individus ont été collectés à l'aval de Luchon (Pique aval) au niveau de quatre sites (voir Fig. 1). Toutes ces truites étaient dans leur troisième cycle de vie (2+, Fig. 2). Cinq autres truites ont été collectées dans la Pique amont, soit entre Ravi et la confluence de l'Ône à Bagnères de Luchon. Enfin, quatre truites de 80 à 160 mm (1+ /2+) ont été prélevées dans un affluent de petite taille de la Pique aval, le ruisseau de Juzet.

Sur l'axe Garonne, 51 truites ont été collectées au niveau de 7 sites dont 2 en amont de la confluence avec la Pique (Fos et Arlos), 2 entre la confluence de la Pique et de la Neste d'Aure (Ore et Seilhan) et 3 en aval de la confluence avec la Neste d'Aure (Montréjeau, Villeneuve, Saint-Martory). Le détail du nombre d'individus par sites est présenté sur la Fig. 1. Ces individus étaient partagés entre leur troisième ou quatrième cycle de vie (2+ ou 3+ ; Fig.2).

Sur le bassin du Lys, 33 truites ont été analysées dont 25 dans l'axe du Lys et 8 sur ces affluents (Houradade, Enfer, pépinière souci, pépinière Cierque, Lespone). Elles étaient probablement dans leur troisième, quatrième ou cinquième cycle de vie (2+, 3+ ou 4+).

A ces individus s'ajoutent 6 truites prélevées sur le site de pisciculture de Soueich en 2013. La localisation des stations d'échantillonnage des truites est visible sur la Figure 1.

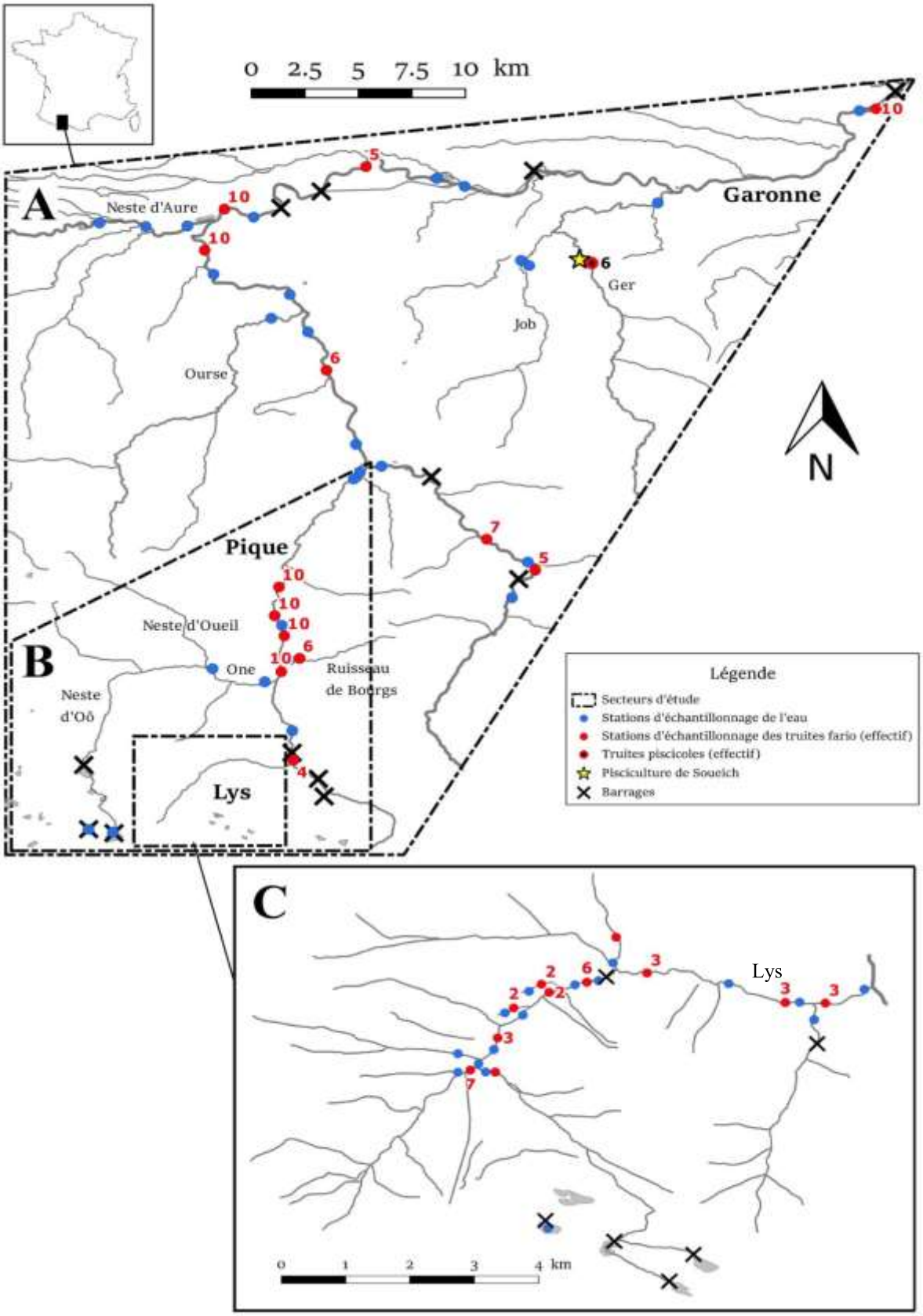


Figure 1 : Carte du site d'étude et des stations d'échantillonnage. Serveur du Bassin Adour-Garonne ; IGN BD Carthage – BD Carto

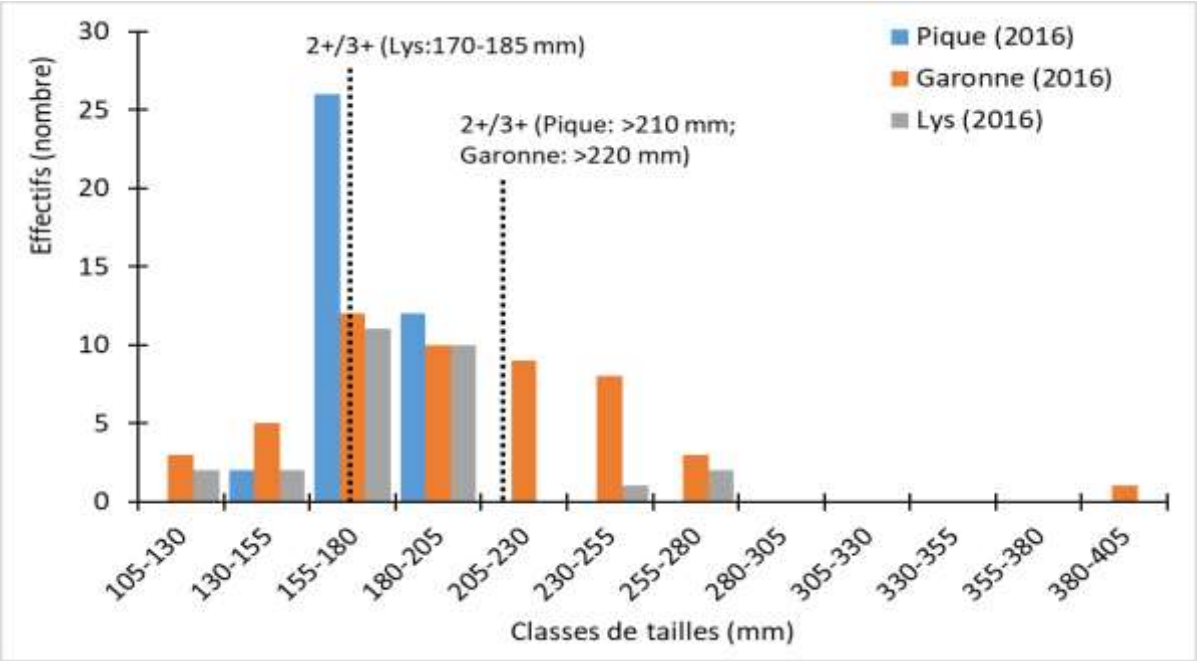


*Figure 2 : distribution des individus par classes de tailles. Ligne verticale en pointillée : taille des truites en mm évaluée à 3 ans dans le secteur d'étude selon la formule établie par Lagarrigue et al. (2001) dans les Pyrénées centrale : T3ans=-59.38*Ln(x)+588.74, x représente l'altitude du site de prélèvement en mètre.*

3. Extraction et préparation des otolithes

Les crânes des truites ont été conservés dans de la glace et transportés au laboratoire pour dissection. Les paires sagitta d'otolithes ont été extraites de chaque individu, rincées à l'eau distillée et séchées à température ambiante sous hotte à flux laminaire avant stockage dans des microtubes de 1 ml. Les otolithes ont ensuite été placés dans des moules en silicone et inclus dans une résine époxy (Araldite 2020, Escil, France). Après un temps de durcissement de ~48h, les inclusions ont été démoulées et poncées à l'aide d'une polisseuse (Escil, France) et de disques de papier silice (grains de 800 à 4000) arrosés d'eau MilliQ (18,2 MΩ). Le ponçage a été réalisé de manière à obtenir une coupe des otolithes selon un plan sagittal passant par le primordium de croissance (voir Figure 3), prêt pour l'analyse des rapports isotopiques.

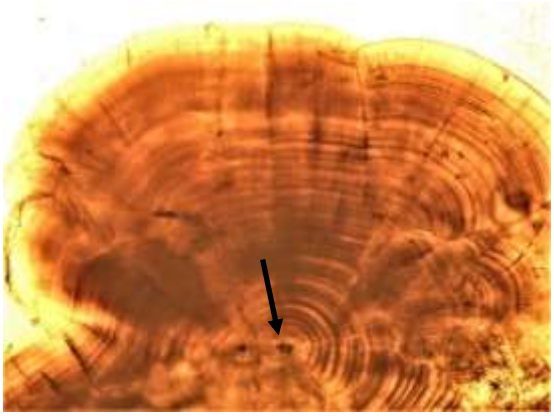


Figure 3 : Photographie de la face ventrale d'un otolithe de truite fario prêt pour l'analyse du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr. La flèche montre le primordium de croissance de l'otolithe (ou nucleus).

4. Analyses de l'isotopie du Strontium

a. *Principe et fonctionnement : le MC-ICP-MS*

Le rapport isotopique du Strontium ^{87}Sr:^{86}Sr de l'eau et des otolithes a été mesuré à l'aide d'un spectromètre de masse à plasma induit (ICP-MS) à multicollection (MC) (Nu Instruments Wrexham, UK). L'ICP-MS est une technique d'analyse multiélémentaire dont le principe repose sur l'atomisation et la séparation des composés ioniques contenus dans l'échantillon ; on parle d'ionisation. L'atomisation est induite par un plasma d'Argon (Ar), et la séparation des différents éléments se fait par traitements électrostatique et magnétique. L'ICP-MS multicollecteur, ou MC-ICP-MS, permet la dispersion du faisceau ionique selon le rapport m/z (masse/charge) et une collecte en simultané des isotopes que l'on veut mesurer dans l'échantillon. Il en résulte une grande précision et une justesse dans les mesures des rapports isotopiques des métaux et métalloïdes, en comparaison à d'autres ICP-MS (Martin, 2013). Le principe de fonctionnement d'un MC-ICP-MS est schématisé en Figure 4.

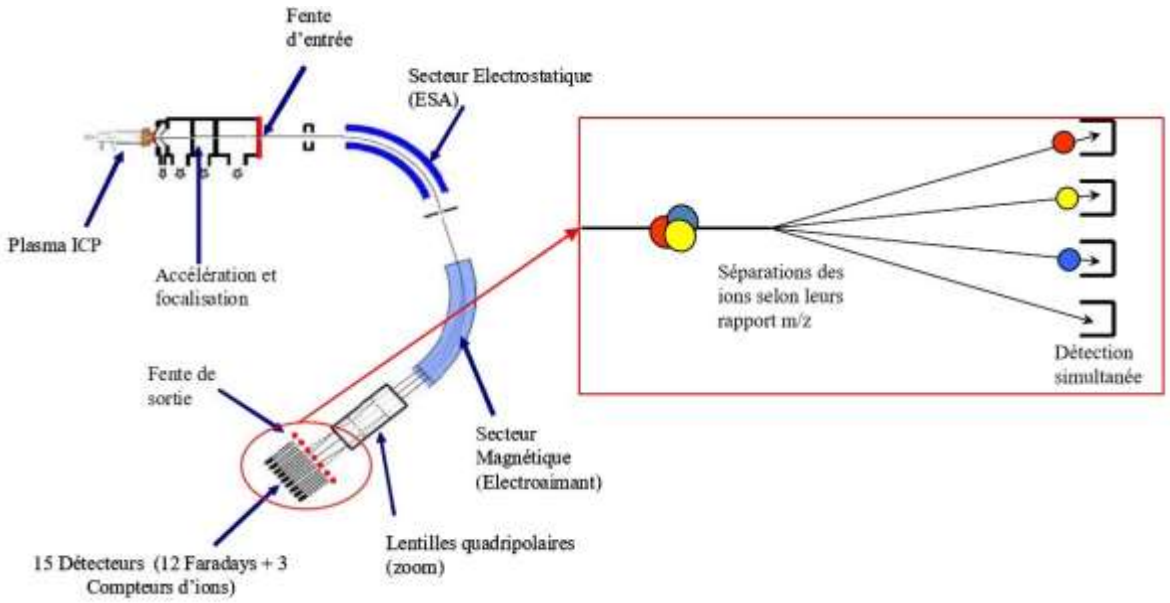


Figure 4 : Schéma de fonctionnement d'un MC-ICP-MS Nu Plasma (Martin, 2013).

b. *Mesure du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr de l'eau*

Un volume approprié de chaque échantillon (de 7 à 50 ml) a été évaporé dans le but d'obtenir 4 µg de Strontium. Le précipité obtenu après évaporation a été dissous dans une

solution de 3M HNO_3, puis purifiés afin d'éliminer les éléments pouvant créer des interférences dans les mesures (comme le ^{87}Rb, de même nombre de masse que le ^{87}Sr). La purification a été réalisée par séparation de matrice sur colonne au moyen d'une résine échangeuse de cations (résine Sr-R50-S, Eichrom Technologies), d'élutions séquentielles avec de l'eau ultra-pure et 3M HNO_3, dans le but d'obtenir une concentration finale de 200 µg/l de strontium. Les échantillons purifiés ont été ensuite transformés en aérosol grâce à un nébuliseur pneumatique et introduits dans le MC-ICP-MS pour analyse isotopique. La fiabilité et la précision de l'analyse isotopique a été contrôlée grâce à un Matériel Standard de Référence (SRM 987).

c. Mesure du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des otolithes par LA-MC-ICP-MS

Pour chaque otolithe, la mesure du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr a été réalisée le long d'un transect de 160 à 300 µm de large, commençant 200 µm avant le primordium de croissance et dirigé vers la face ventrale de l'otolithe. La largeur du faisceau nécessaire à l'obtention d'une quantité appropriée de matériel pour une analyse fiable du rapport isotopique du Sr, dépendait de la concentration en Sr de l'otolithe ; plus cette concentration était importante et moins large était le faisceau du laser. Le prélèvement de matière a été réalisé par un système d'ablation laser (LA) femto-seconde (Alfamet Novalase, France) sur une profondeur de ~40 µm. Le principe de l'ablation laser est basé sur l'induction à haute fréquence (500 Hz) d'une grande quantité d'énergie lumineuse Infra Rouge à la surface de l'otolithe, conduisant à la création d'un aérosol, qui est alors transporté de la cellule d'ablation vers le MC-ICP-MS grâce à un flux d'Hélium (He). Ce flux de gaz est ensuite mélangé à un flux d'Argon (Ar) et à un aérosol humide (2% HNO_3) au niveau d'une torche à plasma à double entrée au niveau de l'ICP. Un matériau de référence composé d'otolithes d'un poisson marin (NIES 22, National Institute for Environmental Studies, Japan, Yoshinaga et al, 2000) au ratio ^{88}Sr:^{86}Sr invariant a été utilisé pour corriger les biais de masse induits par le dispositif instrumental en utilisant une loi exponentielle (Martin et al, 2013).

5. <u>Analyse statistique</u>

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel R (3.3.0) (R Core Team, 2016). Les profils d'isotopie des otolithes de truite obtenus par LA-MC-ICP-MS ont été attentivement observés avant traitement statistique dans le but d'identifier (i) les valeurs de ratio

^{87}Sr:^{86}Sr correspondant à la zone centrale (ZC) de l'otolithe (i.e. la phase prénatale du poisson), (ii) les valeurs ^{87}Sr:^{86}Sr enregistrées par l'otolithe dans le premier milieu de vie du poisson (M1), et (iii) les valeurs ^{87}Sr:^{86}Sr enregistrées par l'otolithe lors d'un séjour éventuel dans des environnements chimiquement distincts (M2, M3). Chaque individu a donc été associé à 4 valeurs moyennes de ^{87}Sr:^{86}Sr (ZC, M1, M2 et M3). Dans le cas où il n'a pas été possible de distinguer 4 zones d'isotopie différente sur le profil isotopique (cas de poissons s'étant développés dans un environnement unique à partir de M1 ou de M2), la valeur du dernier milieu visité a été dupliquée afin d'homogénéiser le jeu de données. Pour la suite des analyses, nous assumons le fait que les valeurs mesurées sur ces profils correspondent fidèlement à la signature isotopique de l'eau au moment de l'incrémentation des éléments dans l'otolithe puisqu'aucun fractionnement biologique n'a été observé sur ce rapport.

Nous avons cherché dans un premier temps à déterminer l'origine natale des truites de la zone d'étude afin de différencier les individus issus de la pisciculture de ceux nés de reproduction naturelle, et afin de déterminer le stade de déversement des truites piscicoles (M1 = ZC signifiant un déversement au stade juvénile (alevin de printemps ou d'automne), M1 ≠ ZC un déversement au stade œuf ou alevin vésiculé. Après avoir centré et réduit les données d'isotopie, deux Analyses en Composantes Principales (ACP) ont été réalisées sur les variables ZC et M1 des individus des secteurs A et B, secteurs alimentés par l'alevinage. Une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a ensuite été conduite à partir des coordonnées de chaque ACP (selon la méthode de Ward, qui minimise la somme des carrés intra-groupes), dans le but d'identifier une éventuelle structure au sein de chaque système. Ces premières analyses nous ont permis de poser l'hypothèse d'une origine naturelle ou piscicole pour l'ensemble de ces individus.

Nous avons ensuite tenté d'apporter des précisions quant à l'histoire de vie des individus échantillonnés. Les truites au profil isotopique incomplet (otolithes endommagés) n'ont pas été conservées dans cette partie de l'étude. Trois nouvelles ACP ont été réalisées pour les individus de chacun des secteurs A, B et C, cette fois-ci en considérant l'ensemble des valeurs d'isotopie mesurées (ZC, M1 M2 et M3), et une nouvelle CAH a été conduite à partir des coordonnées de chaque ACP dans le but de distinguer des profils isotopiques « types » dans chaque secteurs d'étude.

Résultats

1. Rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des eaux.

Les rapports ^{87}Sr:^{86}Sr mesurés dans les échantillons d'eau des différentes stations, sont présentés en Figure 5. Ces analyses d'eau ont été réalisées afin de faire un premier « screening » du secteur d'étude dans le but d'évaluer si des contrastes géochimiques suffisant étaient susceptibles d'exister. Il faut Cependant garder à l'esprit qu'une prise ponctuelle d'échantillon d'eau ne témoigne pas à coup sûr de la réalité des valeurs retrouvées tout au long de l'année, en particulier dans des secteurs soumis à des activités hydroélectriques et des contrastes saisonniers au niveau de leur cycle hydrologique (fonte des neiges, crues de printemps et d'automne, étiage estival). A partir des prélèvements réalisés, la distribution du ^{87}Sr:^{86}Sr de l'eau montre néanmoins que :

- la Garonne à l'aval de la confluence avec la Neste d'Aure jusqu'à Saint-Martory présenterait un rapport isotopique généralement plus faible (<0.7113) que celui observé dans la Garonne en amont de cette confluence (>0.7115).
- Une différence importante semble exister entre la Pique amont (0.7146) et la Pique aval (0.7129), ainsi qu'entre la Pique aval et la Garonne (0.7116). La faible valeur du rapport isotopique observée dans la Garonne amont (confluence Pique jusqu'au plan d'Arem) et son homogénéité jusqu'à la confluence avec la Neste lors de notre échantillonnage n'est pas en accord avec les données disponibles dans la littérature (Semhi et al., 2000). Ces auteurs ont mesuré un rapport isotopique d'environ 0.7124-0713 au niveau de la Garonne en amont de sa confluence avec la Pique, rapport similaire à la Pique aval, et un rapport isotopique plus faible juste avant la confluence avec la Neste (0712). Il est possible que nos échantillons de la Garonne ne soient pas représentatifs du rapport présent une bonne partie de l'année en raison de conditions particulières le jour des prélèvements. Le rapport isotopique de la Pique (0.7129) pourrait donc être relativement proche de celui de la Garonne amont, et par suite les deux seraient alors difficilement différenciable.
- Deux affluents, l'Ourse et le Ger, présentait des rapports isotopiques proches de celui de la pisciculture de Soueich, ce qui est assez logique dans le cas du Ger puisque la

pisciculture est alimentée par ce cours d'eau. Ceci augurait des difficultés dans la discrimination de truites sauvages de ces deux affluents dévalant dans la Garonne.

- Des contrastes assez marqués entre l'axe principal du Lys et les ruisseaux « pépinière souci », Lespone et Bonéou, ainsi que pour le Lys entre l'amont et l'aval de la confluence de Lespone.

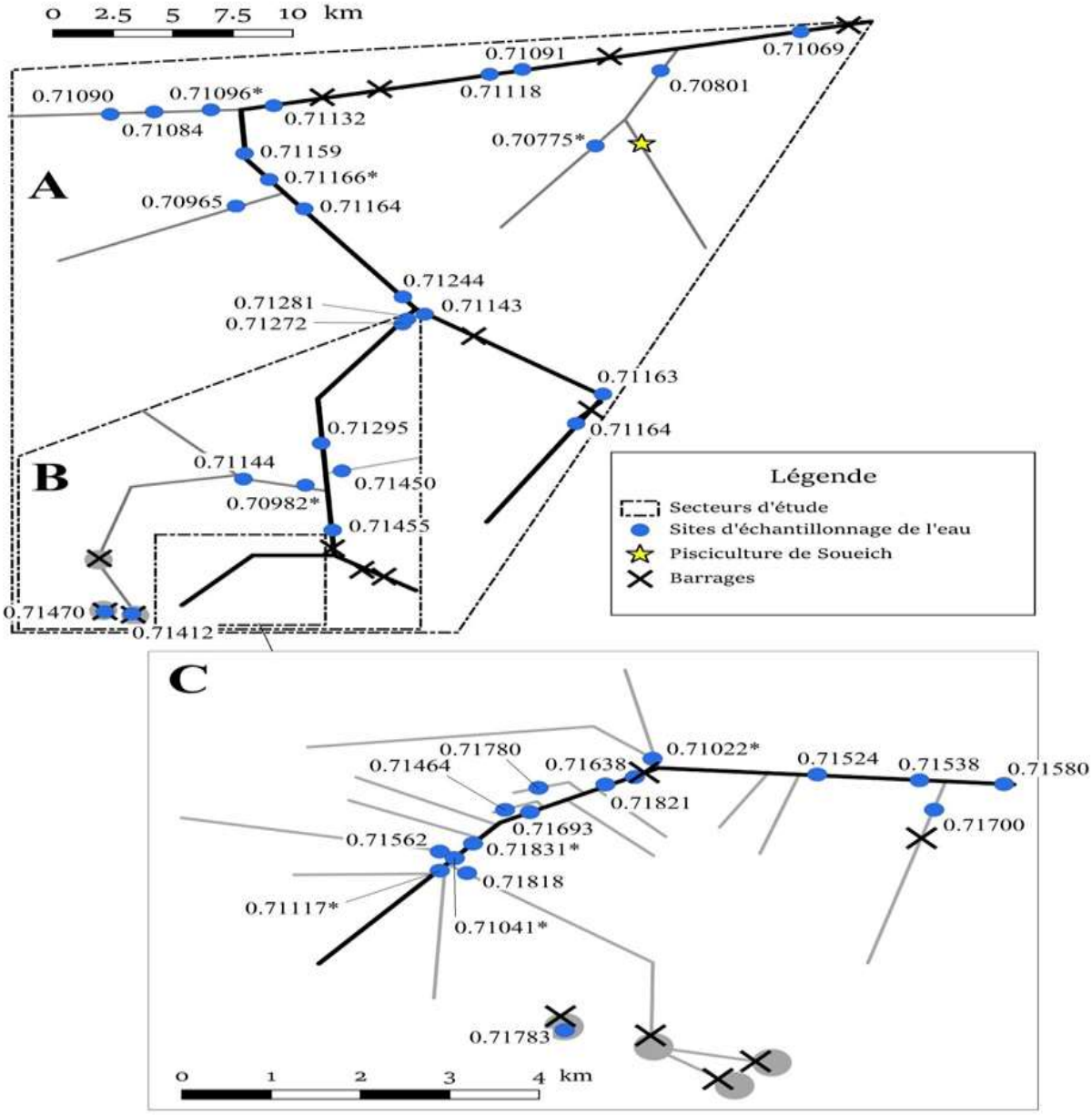


Figure 5 : distribution géographique du 87Sr :86Sr des eaux lors d'une campagne ponctuelle. Etoile : pisciculture de Soueich.

2. Identification de l'origine natale sauvage ou pisciculture des truites fario et du stade de déversement

2.1 - Rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des otolithes de truites certifiées de pisciculture (Soueich)

Les otolithes de 6 truites fario issues de la pisciculture de Soueich ont été analysés ; leurs profils isotopiques sont présentés en Figure 6. Le ratio ^{87}Sr:^{86}Sr de ces otolithes est compris dans une gamme de valeurs allant de 0.7079 à 0.7093. Mis à part l'Ourse et le Ger, pour l'ensemble des secteurs étudiés le rapport isotopique présente des valeurs significativement plus élevées que celles de la pisciculture de Soueich, suggérant qu'il est possible de repérer assez facilement des individus en provenance de la pisciculture dans ces différents secteurs.

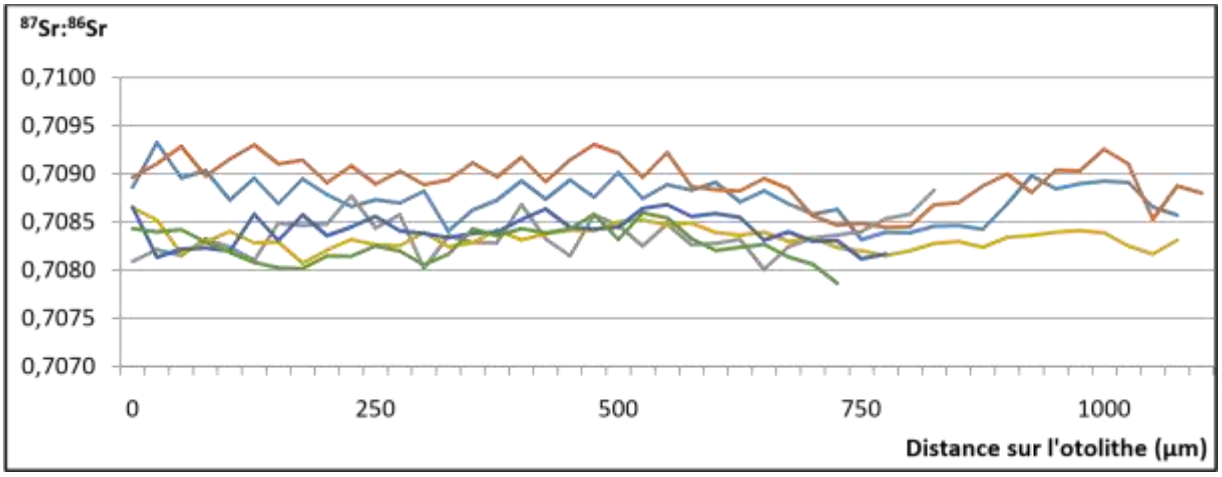


Figure 6 : Profils isotopiques pour le rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des 6 truites fario issues de la pisciculture de Soueich.

2.2 - Identification de l'origine natale sauvage ou pisciculture des truites fario et du stade de déversement

Compte tenu des résultats obtenus pour les truites originaires de la pisciculture de Soueich, nous avons procédé comme explicité sur la figure 7 pour déterminer l'origine natale sauvage ou pisciculture et le stade de déversement des truites collectées dans les différents secteurs d'étude. Deux zones de l'otolithe ont été utilisées, la zone centrale (ZC) qui permet de discriminer l'origine sauvage ou pisciculture et la zone juste après (M1) qui correspond au développement des alevins après résorption de leur sac vitellin et permet donc de déterminer le stade de déversement des individus issus de la pisciculture.

Brièvement, lorsque le ^{87}Sr:^{86}Sr de la ZC est <0.7095 alors la truite est originaire de la pisciculture (ou du Ger et de l'Ourse), alors que pour une valeur plus élevée la truite est à coup sûr sauvage. En ce qui concerne le stade de déversement, si le ^{87}Sr:^{86}Sr de M1 reste <0.7095 alors la truite a été introduite dans le milieu au stade alevin de printemps ou d'automne. Si le ^{87}Sr:^{86}Sr en M1 est >> 0.7095 alors le déversement c'est fait au stade œuf ou alevin vésiculé.

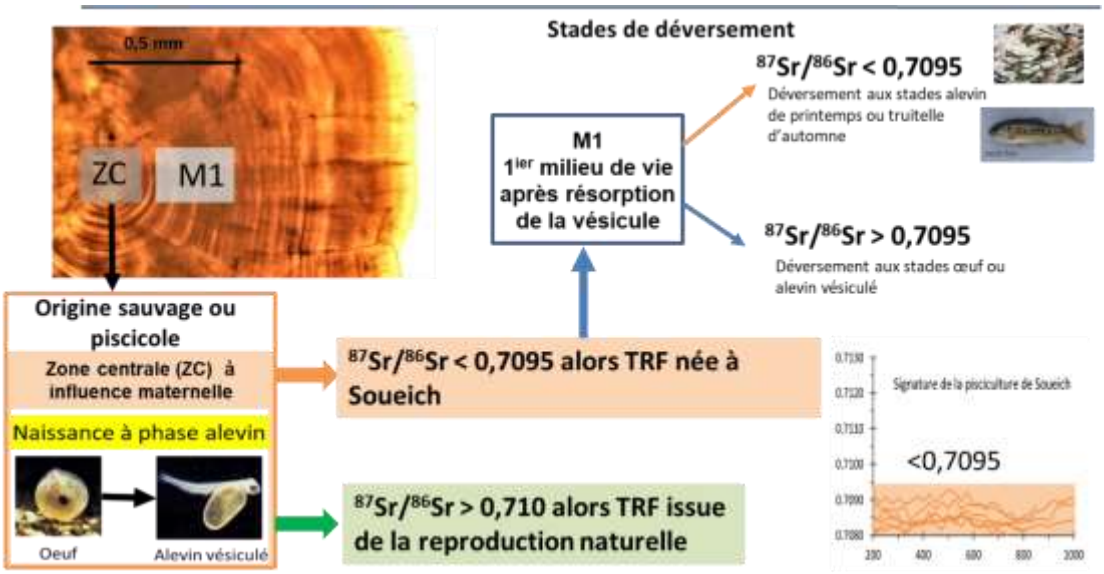


Figure 7 : clés de détermination de l'origine natale sauvage ou pisciculture et du stade de déversement.

Un exemple d'individus originaires de la pisciculture et déversés à Villeneuve à différents stades de leur développement est présenté sur la figure 8.

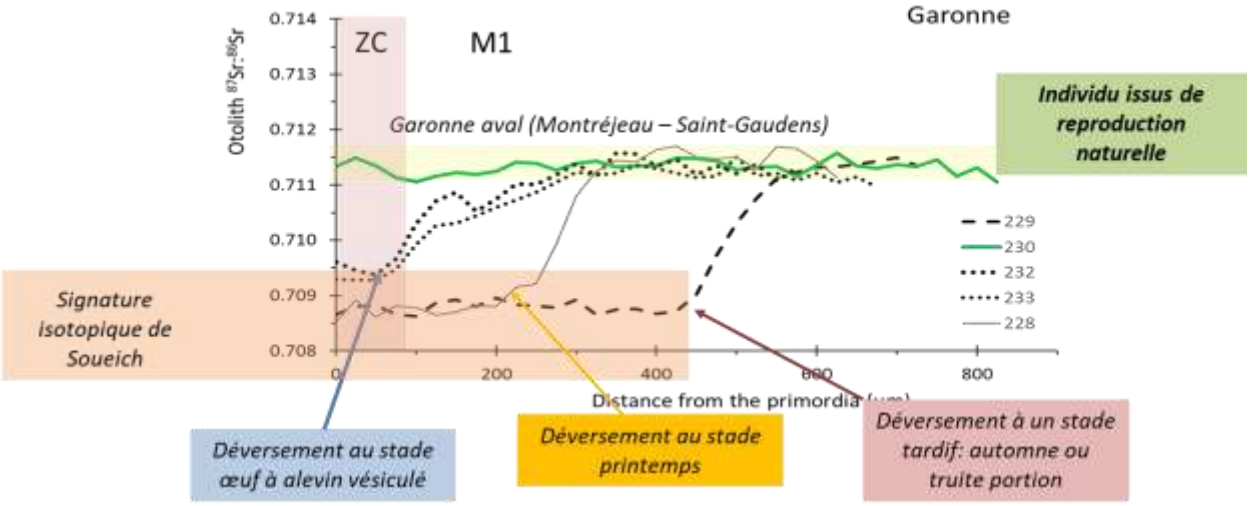


Figure 8 : exemple de truites de pisciculture déversées à différents stades de développement sur le site de Villeneuve ; comparaison avec un individu né sur le site de prélèvement (230).

Pour le secteur A (i.e. Garonne amont et affluents, Pique non-incluse), quatre groupes d'individus ont pu être distingués : deux de ces groupes sont exclusivement composés de truites issues de reproduction naturelle (ZC > 0.71090) (N = 18), les deux autres correspondent à des individus issus principalement de l'alevinage (ZC < 0.7095) (N = 33) (voir Figure 9, annexe 1).

Les deux groupes d'individus nés de reproduction naturelle (ellipses noires) se distinguent par leurs sites de capture : en amont (^{87}Sr:^{86}Sr plus élevé) vs en aval de la confluence de la Garonne avec la Neste d'Aure (^{87}Sr:^{86}Sr plus faible).

Les deux groupes de truites nées en pisciculture (ellipses rouges, figure 9) diffèrent par leurs valeurs ^{87}Sr:^{86}Sr en M1 : plus faibles (ellipse rouge de gauche sur la Figure 9) correspondant à des déversements au stade œuf ou alevin vésiculé vs plus fortes (à droite) correspondant aux déversements d'alevins de printemps et d'automne. Il est à noter qu'un individu pêché à Saint-Martory, en aval de la confluence du Ger avec la Garonne, et un individu pêché à Seilhan proche de la confluence de l'Ourse, présentaient des signatures ^{87}Sr:^{86}Sr (0.710< ZC < 0.7095) proche de celle de la pisciculture de Soueich. Ces deux individus pouvaient provenir de reproduction naturelle dans le Ger ou l'Ourse comme de la pisciculture de Soueich. Grâce aux données de l'analyse génétique fournie par S. Blanchet nous avons pu conclure que la truite de Saint-Martory était une truite sauvage dévalant du Ger, par contre la truite de Seilhan était une truite issue de la pisciculture.

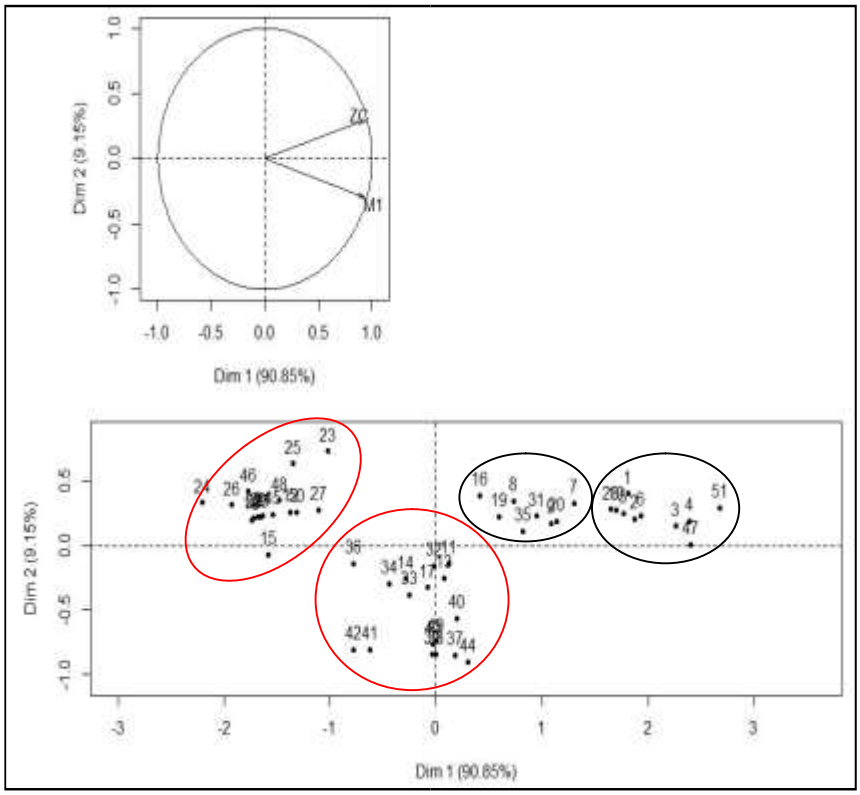


Figure 9 : Analyse en Composantes Principales réalisées à partir du ^{87}Sr:^{86}Sr des zones ZC et M1 sur les individus de la Garonne (secteur A). Les ellipses de couleurs correspondent aux groupes de truites (clusters) significativement discriminées par l'Analyse Hiérarchique en Clustering (CAH). Les ellipses rouges représentent les individus originaires de la pisciculture et ceux des ellipses noires de la reproduction naturelle (sauvage).

Pour le secteur B (i.e. Pique et affluents), notre analyse a aussi permis de dégager 4 groupes d'individus (voir Figure 10, Annexe 2). Les individus compris dans l'ellipse rouge correspondent à des truites originaires de la pisciculture de Soueich et qui ont été déversés au stade alevin de printemps ou d'automne (faible rapport isotopique en M1). Les deux individus marqués d'un astérisque rouge sont également issus de la pisciculture mais présentent un fort rapport isotopique en M1 en raison de leur déversement au stade œuf et le fort rapport isotopique de leur site de développement (0.714-0.715) au niveau du ruisseau de Juzet ou de la Pique amont. L'ensemble des individus originaires de la pisciculture ont été collectés au niveau de deux sites, le ruisseau de Juzet à l'aval et la Pique amont à l'aval de la confluence avec le Lys.

Les individus issus de reproduction naturelle sont séparés en deux groupes (ellipses noires). L'ellipse noire la plus à droite regroupe des truites capturées essentiellement dans la Pique amont et dans le ruisseau de Juzet qui sont caractérisés par des rapports isotopiques élevés (>0715). L'ellipse noire de gauche contient quant à elle l'ensemble des poissons collectés dans la Pique aval. Cette différenciation Pique amont / Pique aval est parfaitement cohérente avec les données obtenues sur les eaux.

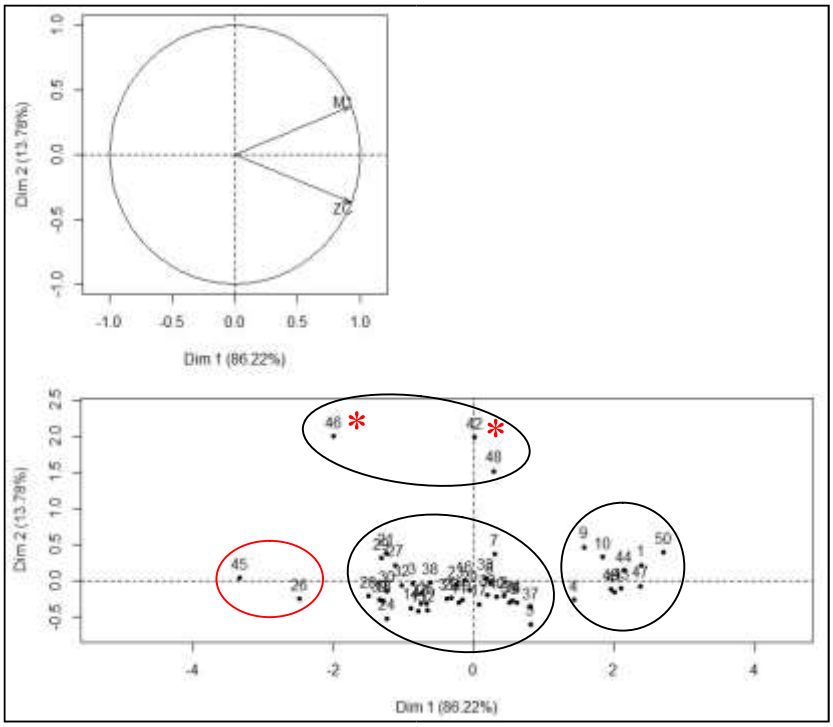


Figure 10 : Analyse en Composantes Principales réalisées à partir des valeurs de ^{87}Sr:^{86}Sr des zones ZC et M1 sur les individus de la Pique (secteur B). L'ellipse rouge et les astérisques rouges correspondent aux truites originaires de la pisciculture et ceux des ellipses noires de la reproduction naturelle (sauvage).

Enfin, dans le secteur C, correspondant au Lys et à ses ruisseaux tributaires, une seule truite fario a été identifiée comme étant issue de la pisciculture de Soueich (ZC = 0.70910), alors qu'aucun alevinage n'est officiellement pratiqué sur ce bassin. Tous les autres poissons sont issus de la reproduction naturelle.

Sur la figure 11, nous présentons **la distribution de l'origine natale pisciculture / reproduction naturelle et des stades de déversement pour les individus de pisciculture** en fonction de chaque sites de prélèvements sur les deux secteurs alevinés, Garonne (A) et Pique (B). Deux secteurs se dégagent vis-à-vis de la proportion d'individus de pisciculture.

La **partie aval de la Garonne**, de la zone comprise entre Ore et la confluence avec Ourse jusqu'à Saint-Martory (zone en jaune sur la figure 11), **est principalement peuplée de truite de pisciculture (70% - 90%).**

C'est par contre l'inverse dans la **partie amont de la Garonne et le bassin de la Pique** où **plus de 95% des truites sont issues de la reproduction naturelle** (zone en vert sur la Fig. 11).

En ce qui concerne le stade de déversement des individus de pisciculture, on observe une prépondérance du stade œuf/alevin vésiculé à Villeneuve et Saint-Martory, alors que les alevins de printemps semblent dominer à Montréjeau. Il est plus délicat de se prononcer sur le site de Seilhan car pour 4 individus caractérisés par de la vatérite dès la zone M1, il n'a pas été possible de déterminer le stade de déversement (camembert bleu).

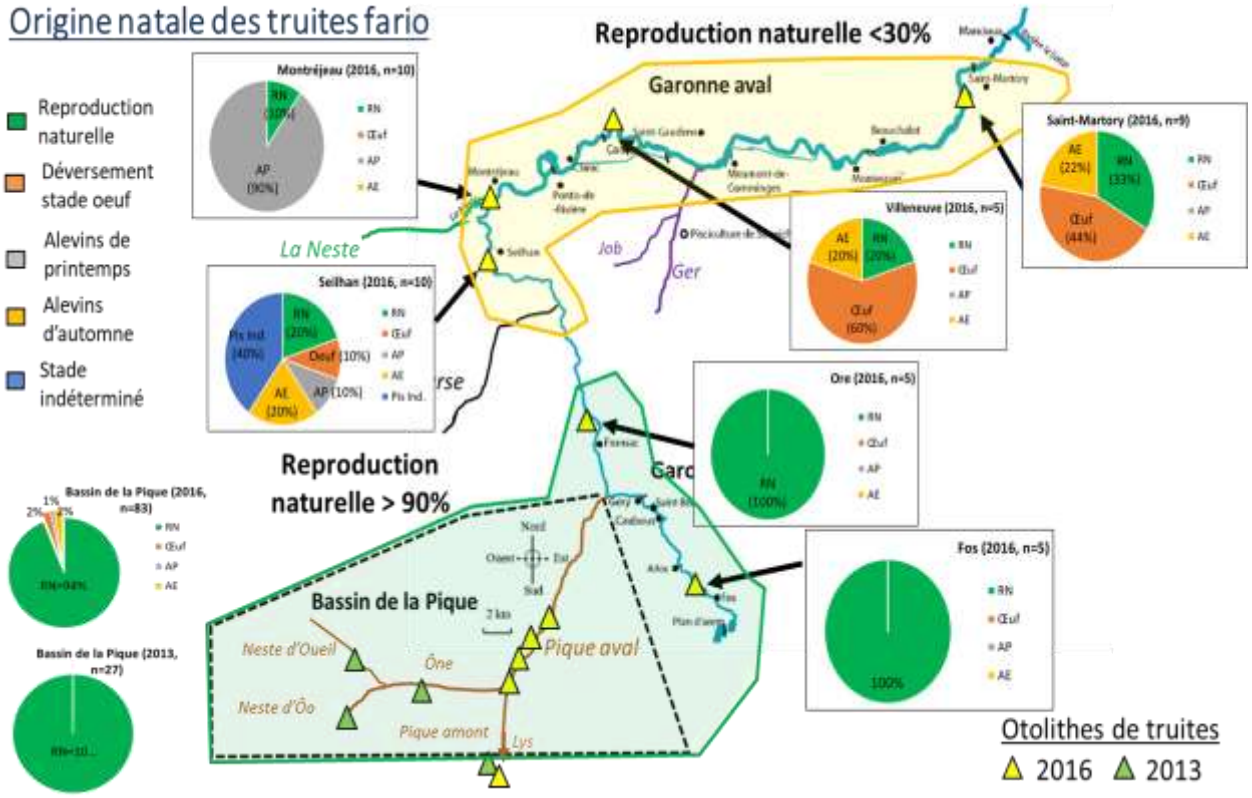


Figure 11 : bilan de la distribution des proportions de truites fario issues de la reproduction naturelle et de la pisciculture de Soueich dans le secteur d'étude. Contribution des différents stades de déversements.

3 Détermination de l'histoire de vie des truites fario : déplacements ?

3.1 - Secteur A : Garonne amont et affluents (hors bassin de la Pique)

Cinq individus de pisciculture au profil incomplet en raison de la présence de vatérite ayant été écartés de l'analyse, 46 truites ont été examinées pour leur histoire de vie sur l'axe Garonne. L'analyse basée sur les 4 variables isotopiques (ZC, M1, M2 et M3) des individus du secteur A, a permis de distinguer 8 profils isotopiques types (voir Figure 12). Les valeurs de ZC, M1, M2 et M3 pour chaque profil sont décrites en Annexe 3 ; l'ACP et la CAH ayant permis la constitution de ces profils sont visibles en Annexes 4 et 5. Les profils 4 à 8 correspondent à des poissons issus de l'alevinage. Les zones de capture des truites associées à chaque profil isotopique type sont présentées dans le Tableau 2.

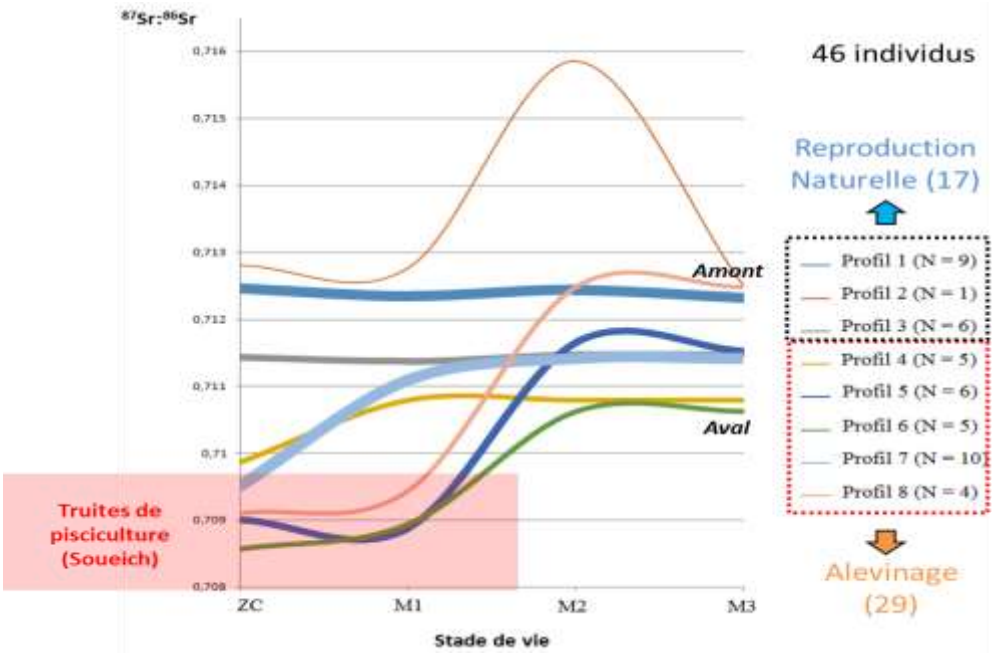


Figure 12 : types de profils isotopiques observés dans le secteur de la Garonne.

Abstraction faite de la partie origine natale (ZC et M1) pour les truites originaires de la pisciculture, 3 valeurs différentes du ^{87}Sr:^{86}Sr sont observées (Figure 12, 13, 14, 15) :

- > 0.7118 regroupant les profils type 1, 2 et 8.
- ≈ 0.7112-0.7118, regroupant les profils type 3, 5 et 7.
- ≈ 0.7105-0,711, regroupant les profils type 4 et 6.

Tous les individus des sites Garonne en amont de la confluence avec la Pique (Fos, Arlos) et deux du site Ore (aval proche de la confluence avec la Pique) présentent la première gamme de valeurs en ^{87}Sr:^{86}Sr (0.7118-0.7135) tout au long de leur vie (Figure 13). Une seule truite semble être née dans un affluent de la Garonne dans ce secteur (202) avec forte isotopie (0.716). Ces valeurs élevées de ^{87}Sr:^{86}Sr ne correspondent pas au rapport isotopique mesuré ponctuellement dans l'eau, confirmant notre suspicion vis-à-vis de la représentativité des prélèvements d'eau réalisés ponctuellement en octobre 2016 sur la partie amont du secteur d'étude. D'autre part, la signature isotopique enregistrée par les truites de Fos et Arlos sur la Garonne est similaire à celle de la Pique aval, aussi il ne sera pas possible de discriminer des truites de la Garonne ayant dévalées de la Pique. Enfin, le rapport isotopique ^{87}Sr:^{86}Sr mesuré sur les otolithes de poissons sédentaires sur les sites de Fos, Ore et Pique montre un rapport quasi invariant tout au long de la vie de ces poissons et avec les valeurs 0.7125-0.713 pour Fos et la Pique et 0.712-0.7123 pour Ore.

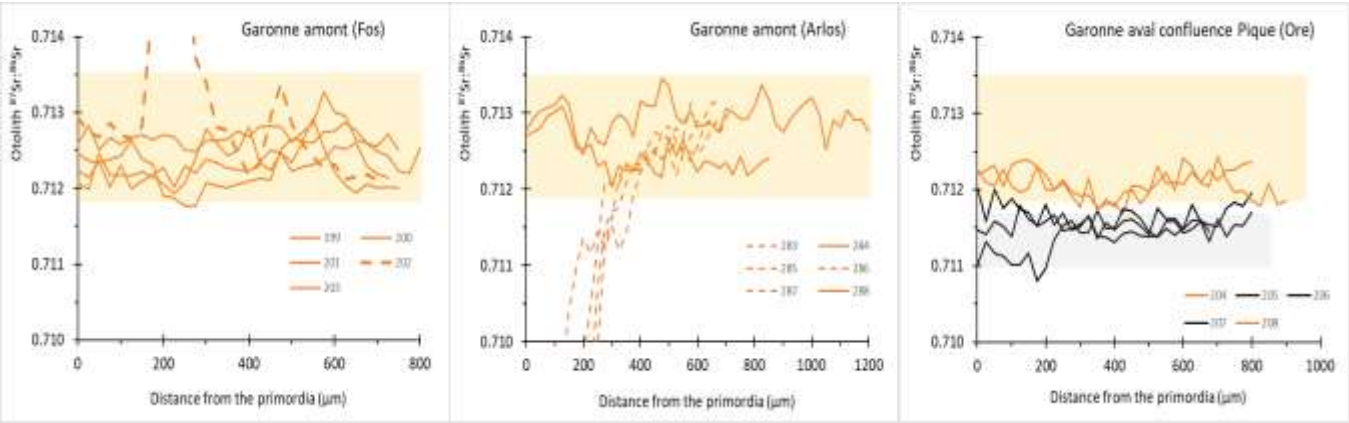


Figure 13 : évolution de l'histoire de vie des truites fario prélevées sur les deux sites en amont de la confluence avec la Pique (Fos, Arlos) et un site à l'aval proche de cette confluence (Ore).

Ceci suggère que les 3 individus capturés à Ore et présentant des valeurs isotopiques plus basse entre 0.711-0.7118 (profils en noir sur la figure 13) ont vécu une grande partie de leur vie très probablement plus en aval dans le deuxième « secteur isotopique » (Figure 14), et plus probablement au niveau du site de Seilhan car il est impossible pour les truites d'atteindre le site d'Ore depuis les sites de Montréjeau et Villeneuve en raison d'obstacles infranchissables à la montaison.

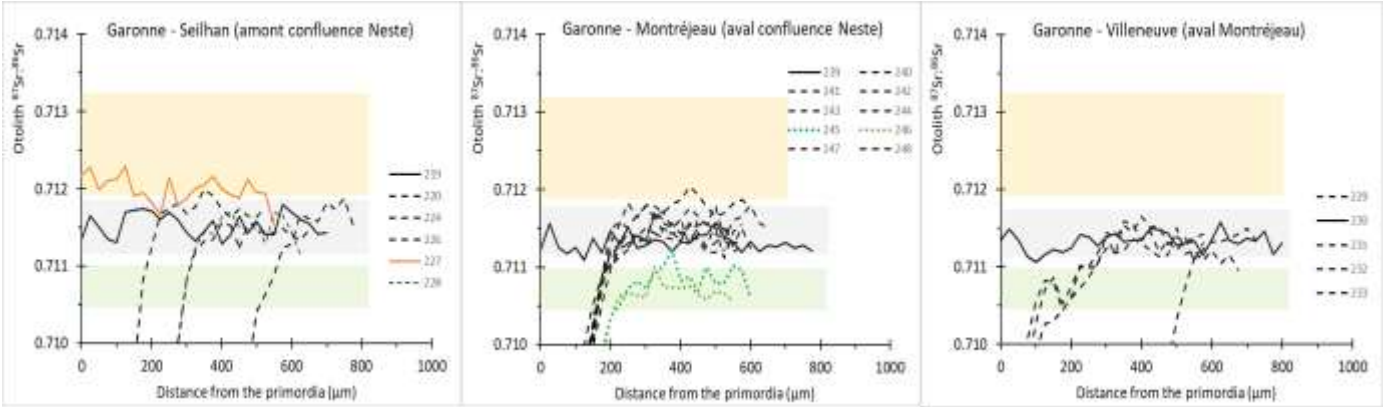


Figure 14 : évolution de l'histoire de vie des truites fario prélevées sur les sites compris entre la confluence de l'Ourse et la confluence du Ger (Seilhan, Montréjeau, Villeneuve).

Les individus des sites de Seilhan, de Montréjeau et de Villeneuve sont restés en grande majorité dans le deuxième « secteur isotopique (0.7112-0.7118) » tout au long de leur vie peu importe leur origine sauvage ou de pisciculture. Seulement 3 individus pourraient avoir fait un déplacement peu de temps avant leur capture. Un individu d'origine sauvage (227), capturé à Seilhan, a probablement dévalé du secteur en amont de la confluence avec l'Ourse (Ore ou aval Ore). Enfin, 2 individus collectés à Montréjeau (245, 246), tous deux d'origine pisciculture, présentent des rapports isotopiques plus faibles que ceux typiquement retrouvés dans le secteur confluence de l'Ourse / confluence du Ger. Ces deux derniers individus pourraient potentiellement provenir de la Neste qui est caractérisée par des eaux de rapport isotopique légèrement inférieur à 0.711 (voir figure 5), la remontée depuis Saint-Martory étant peu probable au regard des obstacles présents entre Montréjeau et Saint-Martory.

Le troisième « secteur isotopique (^{87}Sr:^{86}Sr <0.711) » comprend exclusivement le site de Saint-Martory (Figure 15), soit les individus capturés à l'aval de la confluence de la Garonne avec le Ger. Les truites de ce site sont issues en majorité de la pisciculture. Il n'est pas exclu que certaines ait été déversées en amont de la confluence avec l'Ourse. L'individu 213 de Saint-Martory était vatéritique et donc inexploitable

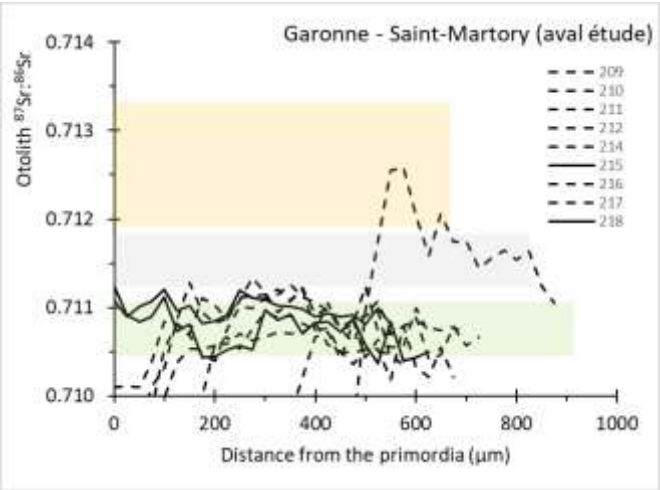


Figure 15 : évolution de l'histoire de vie des truites fario prélevées sur le site de Saint-Martory à l'aval de la confluence de la Garonne avec le Ger.

Les résultats présentés sur l'axe Garonne suggèrent donc qu'une très large majorité des truites n'ont pas changé de « milieu de vie isotopique » (38/46 : tableau 6, figure 16), que ce soit après leur déversement ou après leur naissance sauvage dans cette rivière. Six des huit « migrantes » sont des poissons de pisciculture. Les déplacements restent en général de courte distance sauf dans 1 cas (Fig. 16). Un gradient décroissant du rapport isotopique du strontium (^{87}Sr:^{86}Sr) est observé d'amont vers l'aval, permettant de séparer 3 zones, à priori le secteur de la Garonne en amont de la confluence avec l'Ourse, le secteur de la Garonne compris entre les confluences de l'Ourse et du Ger et le secteur à l'aval de la confluence du Ger.

Tableau 2 : Zone de capture des individus du secteur A (Garonne amont et affluents) selon leur profil isotopique type.

Profil	Zone de capture dans la Garonne (secteur A)			Total	^{87}Sr:^{86}Sr
	Amont confluence Ourse	**Entre Ourse et Ger**	**Aval Ger**		
1	**8**	**1**	0	9	> 0.7118
2	**1**	0	0	1	
8	**4**	0	0	4	
3	**3**	**3**	0	6	0.7112 à 0.7118
5	0	**5**	**1**	6	
7	0	**10**	0	10	
4	0	0	**5**	5	<0.711
6	0	**2**	**3**	5	
Total	16	21	9	46	

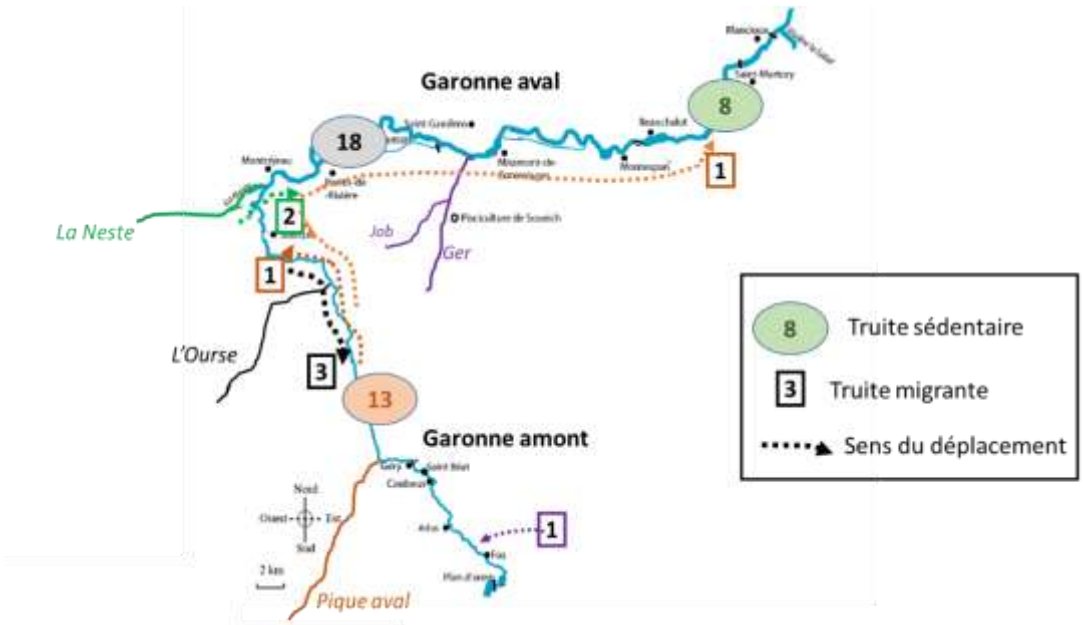


Figure 16 : bilan des traits de vie des truites de la Garonne.

3.2 - Secteur B : Pique et affluents (hors bassin du Lys)

Nous avons vu précédemment que la résilience de la truite fario dans la Garonne à l'aval d'Ore est essentiellement associée au repeuplement (>70%), alors qu'elle est majoritairement liée à de la reproduction naturelle dans la Garonne amont et la Pique (>95%). Une question était alors posée : la résilience post-crue 2013 dans la Garonne amont et dans la Pique aval provient-elle d'une reproduction naturelle dans la Garonne et la Pique ou dans leurs affluents ?

Disposant d'un échantillonnage conséquent de truite fario dans la Pique aval (40 individus) mais aussi des signatures de ces affluents majeurs (Neste D'oueil et d'Ôo, Pique amont), ainsi que d'un affluent mineur situé dans le secteur aval (ruisseau de Juzet), cette question a été abordée dans la Pique aval (Figure 17).

Deux échantillons d'eau collectés dans la Pique aval, l'un à l'aval de la confluence avec l'Ône et l'autre avant la confluence avec la Garonne, montrent que la signature isotopique de cette rivière ne changerait pas radicalement dans la zone d'étude (≈ 0.7129 ; Figure 17). Les signatures de la Neste d'Oeuil (≈ 0.710-0.7105), de la Pique amont (≈ 0.715-0.7135) et du ruisseau de Juzet, obtenues sur des truites présentant des profils constants (absence de déplacement) sont assez différentes de celle de la Pique aval (Fig. 17). L'identification de truites dévalant de ces affluents vers la Pique aval était donc possible. La Neste d'Ôo, quant à elle, présente une signature différente (≈ 0.7113-0.7125) mais pouvant se rapprocher de celle de la Pique aval ; elle apparaissait donc plus délicate à différencier de la Pique aval.

Figure 17 : localisation des échantillonnages de truites fario dans la Pique aval et signatures isotopiques ^{87}Sr:^{86}Sr de la Pique aval (eau, en jaune) et de ses affluents majeurs (Nestes d'Oueil et d'Ôo, Pique amont : otolithes de truites) et du ruisseau de Juzet (otolithes de truites).

Compte tenu de la diversité de types de profils isotopiques obtenus dans la Pique aval, nous allons regarder, dans un premiers temps, séparément les sites de Badech (Fig. 18), de salles et Pratviel/base canoé (Fig. 19) et de pont de Cier (Fig. 20).

- Parmi les 10 truites étudiées sur le site de Badech (Fig. 18), nous avons recensé 3/10 individus (30%), présentant une signature isotopique constante et typique de la Pique aval (orange). 20% des individus proviendraient de la pique amont (pointillés noirs), 30% du ruisseau de Juzet (bleu) et 20% de la Neste d'Ôo ou d'affluents non identifiés. Les 7 individus non originaires de la Pique aval ont rejoint le site de capture relativement rapidement après éclosion.
- Parmi les 10 truites collectées au pont de Salles et Pratviel (Fig. 19), seulement 2 (20%) avaient une signature Pique aval. Post-émergence, 5 avaient une signature isotopique entre 0.7105-0.711 et 3 entre 0.711-0.712 suggérant une naissance et début de vie dans des affluents (Neste d'Ôo ou affluents inconnus) mais pas dans la Pique aval. Parmi ces 8 truites migrantes, 4 se sont déplacées vers le site de capture relativement tôt (pointillés noirs), probablement au stade alevin de printemps. Les 4 autres ne présentent pas du tout la signature du site de capture, même en fin de profil, suggérant qu'ils ont migrés sur ce site seulement quelques semaines avant leur capture, donc pas suffisamment tôt pour que la signature du site de capture apparaisse significativement. Aucun individu de la Pique amont ni de Juzet n'a été observé sur ce site.
- En ce qui concerne le site de la base canoé (Fig. 19), site très proche du site précédent et localisé à proximité de la confluence du ruisseau d'Antignac avec la Pique, aucun poisson ne présente une signature isotopique typique de la Pique aval. On retrouve, comme sur le site précédent des signatures entre 0.710 et 0.712. D'autre part, les 10 individus ne présentent pas du tout la signature de la pique aval en fin de profil, suggérant là encore qu'ils ont migrés sur ce site seulement quelques semaines avant leur capture.
- Enfin, sur le dernier site, le plus aval (Pont de Cier, Fig. 20), on retrouve à nouveau des individus typique de la Pique aval (6/10 : 60%), mais aussi encore quelques individus (4/10 : 40%) avec un rapport isotopique plus faible (0.710-0.712) comme sur les deux sites précédents. Ces 4 derniers poissons ne présentent pas, encore une fois, la signature du site de capture en fin de profil, témoignant d'une dévalaison là encore peu de temps avant leur capture.

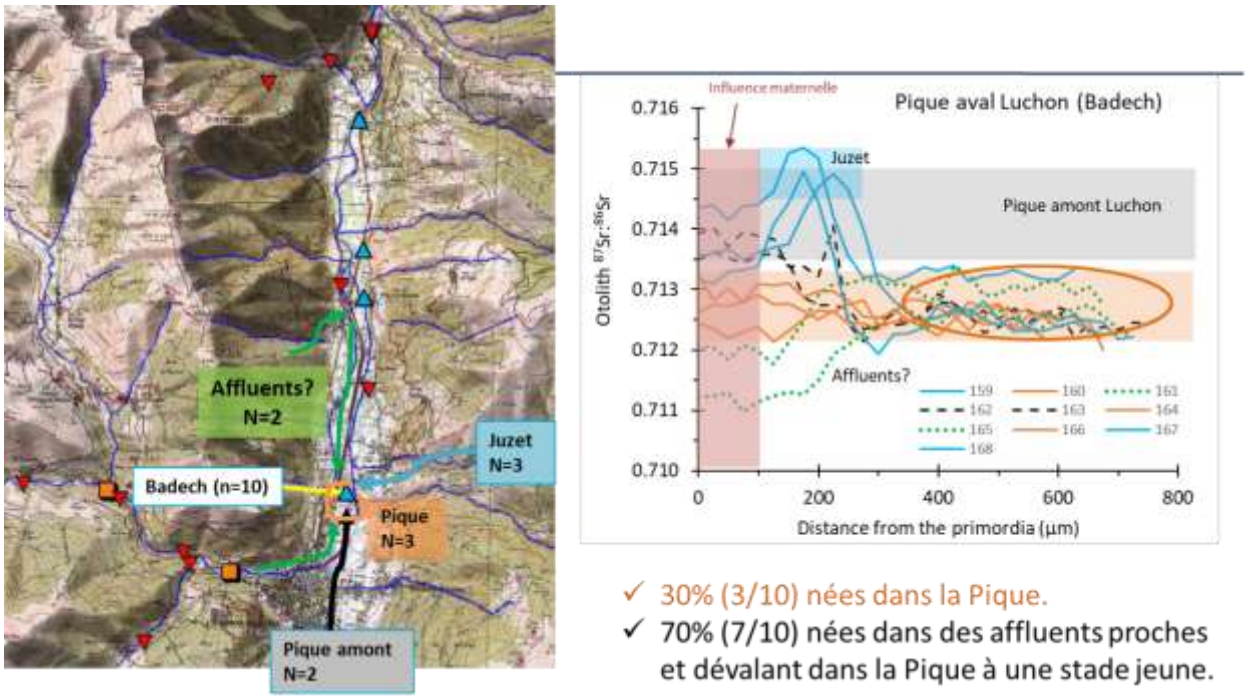


Figure 18 : types de profils isotopiques observés sur le site de Badech (graphique de droite) et proposition de contribution des affluents (carte de gauche). Les zones grisées colorées correspondent aux signatures de la Pique aval (orange), du ruisseau de Juzet (bleu), et de la Pique amont (gris). Les profils en pointillés verts correspondent à des individus issus de la Neste d'Ôo ou d'affluents inconnus (non analysés à ce jour).

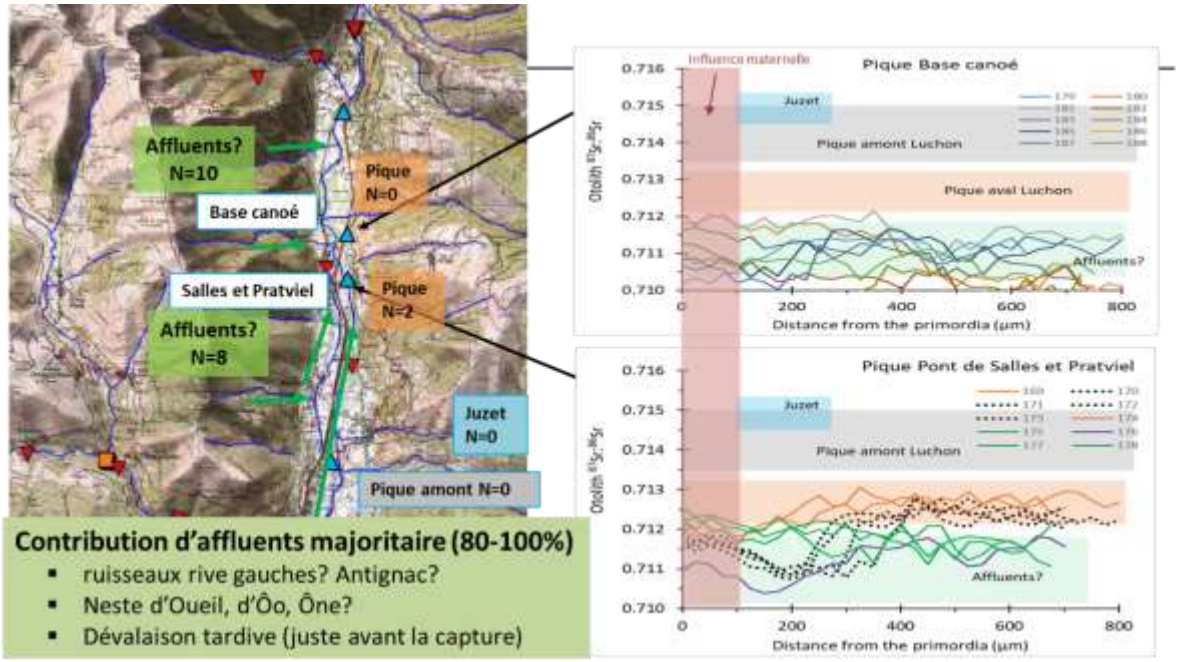


Figure 19 : types de profils isotopiques observés sur le site de Salles et Pratviel et base canoé (graphique de droite) et proposition de contribution des affluents (carte de gauche). Les zones grisées colorées correspondent aux signatures de la Pique aval (orange), du ruisseau de Juzet (bleu), de la Pique amont (gris) et de la Neste d'Ôo ou d'affluents inconnus (vert).

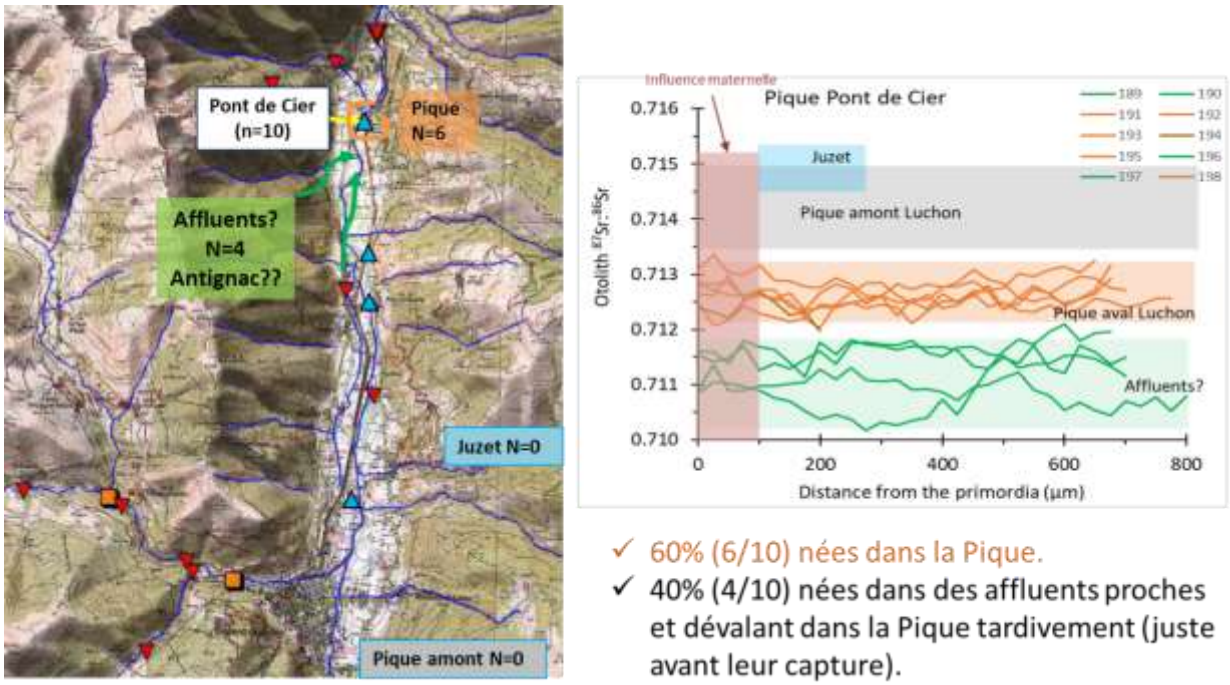


Figure 20 : types de profils isotopiques observés sur le site de Pont de Cier (graphique de droite) et proposition de contribution des affluents (carte de gauche). Les zones grisées colorées correspondent aux signatures de la Pique aval (orange), du ruisseau de Juzet (bleu), de la Pique amont (gris) et de la Neste d'Ôo ou d'affluents inconnus (vert).

Afin d'avoir une vision plus globale du secteur d'étude, nous avons procédé comme pour la Garonne à une analyse statistique en prenant des valeurs moyennes sur les profils isotopiques au niveau de 4 zones, ZC, M1, M2 et M3 (voir méthodologie page 13).

Sept profils types ont été obtenus (voir Figure 21) à partir des valeurs d'isotopie des truites prélevées dans la Pique aval, le ruisseau de Juzet et la Pique amont. Les valeurs de ZC, M1, M2 et M3 des truites de ce secteur sont décrites en Annexe 6 ; l'ACP et la CAH ayant permis la constitution de ces profils sont visibles en Annexes 7 et 8.

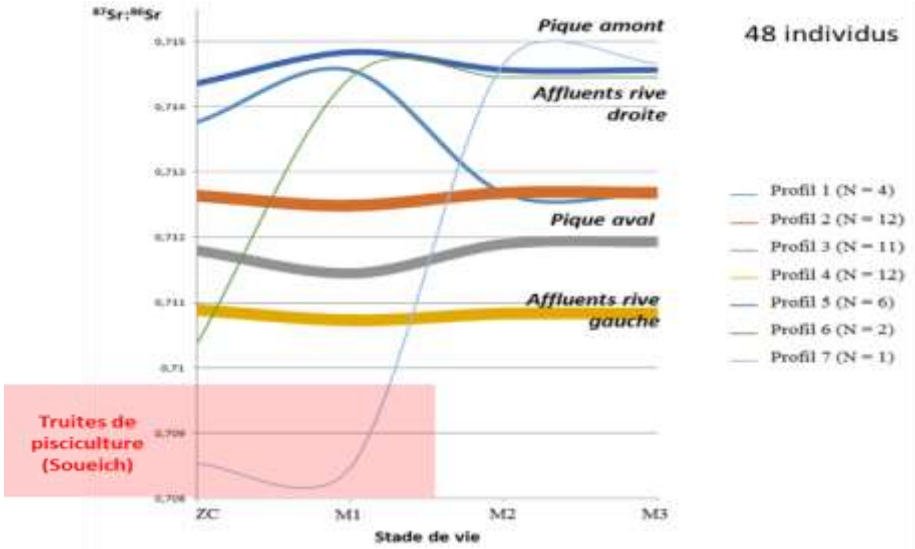
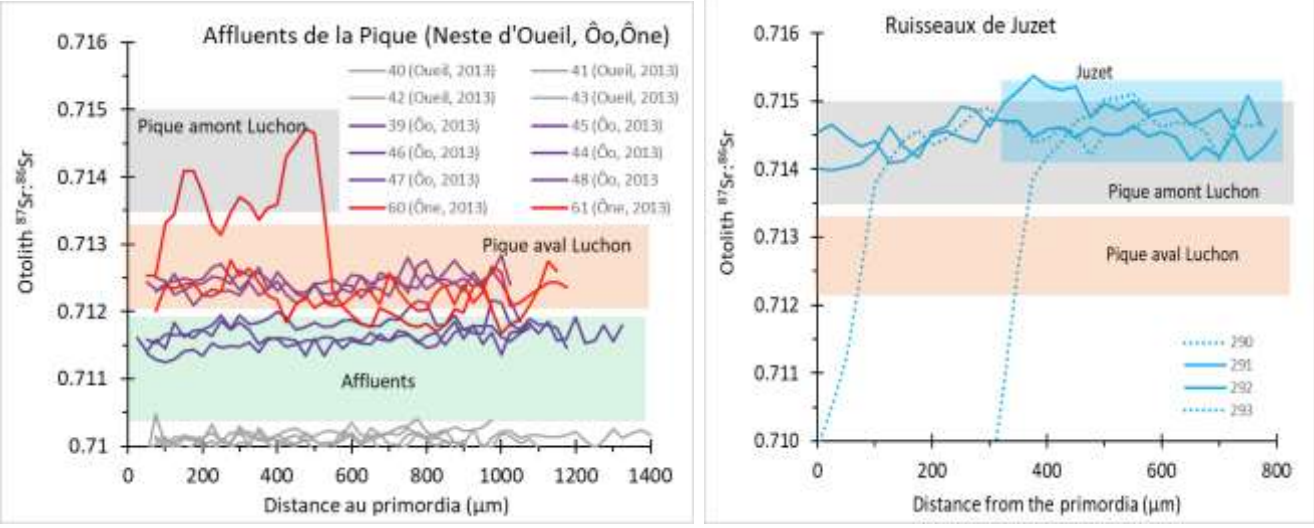


Figure 21 : 7 types de profils isotopiques observés dans le bassin de la Pique (hors Lys).

Il est à noter que les profils types 1, 2, 3 et 4 sont exclusivement constitués d'individus échantillonnés dans la Pique aval (N = 40) mais pas forcément nés dans le secteur de capture. Le profil de type 1 (n=4) représente 1 individu né dans la Pique amont et 3 individus nés dans le ruisseau de Juzet (Figure 22b) qui ont dévalés à un stade jeune dans la Pique aval. Le profil de type 2 (n=12) regroupe les poissons nés dans la Pique aval et qui s'y sont développés tout au long de leur vie. Les profils de type 3 (N=11) et 4 (n=12) correspondent à des poissons qui sont probablement nés dans des affluents rive gauche et s'y sont développés avant de dévaler dans la Pique aval peu de temps avant leur capture. Ces affluents pourraient correspondre à ceux qui sont situés entre Bagnères et le Pont de Cier (Antignac, …) ou plus en amont (Neste d'Ôo, Neste d'Oueil, Ône : Figure 22a). L'arrivée tardive de ces poissons sur les sites de capture est plutôt en faveur d'une alimentation depuis des sites de proximité comme le ruisseau d'Antignac par exemple comme c'est le cas au niveau de Badech avec le ruisseau de Juzet. Cependant, une origine Neste d'Ôo et/ou en partie Neste d'Oueil ne peut pas être exclue, même si la contribution de la Neste d'Oueil est très certainement <5% au regard du faible nombre d'individus présentant des signatures isotopiques inférieures à 0.7105. Néanmoins, si ces truites dévalent des affluents Ôo et Oueil, on peut se demander pourquoi on n'y trouve pas aussi un nombre important d'individus dévalant de la Pique amont et de Juzet.



a) *b)*

Figure 22: profils isotopiques de truites a) capturées dans les Neste d'Ôo et d'Oueil et l'Ône en 2013 et b) dans le ruisseau de Juzet.

Les profils de type 5 contiennent des individus d'origine sauvage, 3 prélevés dans la Pique amont (juste après la confluence avec le Lys) et 3 dans le ruisseau de Juzet (Fig. 22b). Deux truites, identifiées d'origine pisciculture et déversées au stade œuf ou alevin vésiculé, présentent un profil isotopique de type 6, une collectée dans le ruisseau de Juzet (Fig 22b) et une dans la

Pique amont. Enfin, un individu également issu de pisciculture mais déversé au stade alevin de printemps, présente le type de profil 7. Il provient également du ruisseau de Juzet (Fig. 22b).

Au bilan sur les 40 truites collectées en automne 2016 dans la Pique aval, nous avons estimé qu'une large proportion (72%) des poissons collectés (Fig. 23) provient de naissance dans la **Pique amont (5%)** et des **affluents rive gauche et droite (67%) dont nous pensons qu'ils sont de proximité (Juzet, Antignac, …) plus que des Nestes d'Ôo et d'Oueil et de l'Ône**. Cela restera à confirmer. Certains ont dévalés rapidement (27%) dans la Pique aval (printemps à automne de leur première année de vie), alors que d'autres ont rejoint la Pique seulement quelques semaines avant la pêche d'automne (45%). Enfin, seulement **28%** des truites analysées **seraient nées dans la Pique aval**.

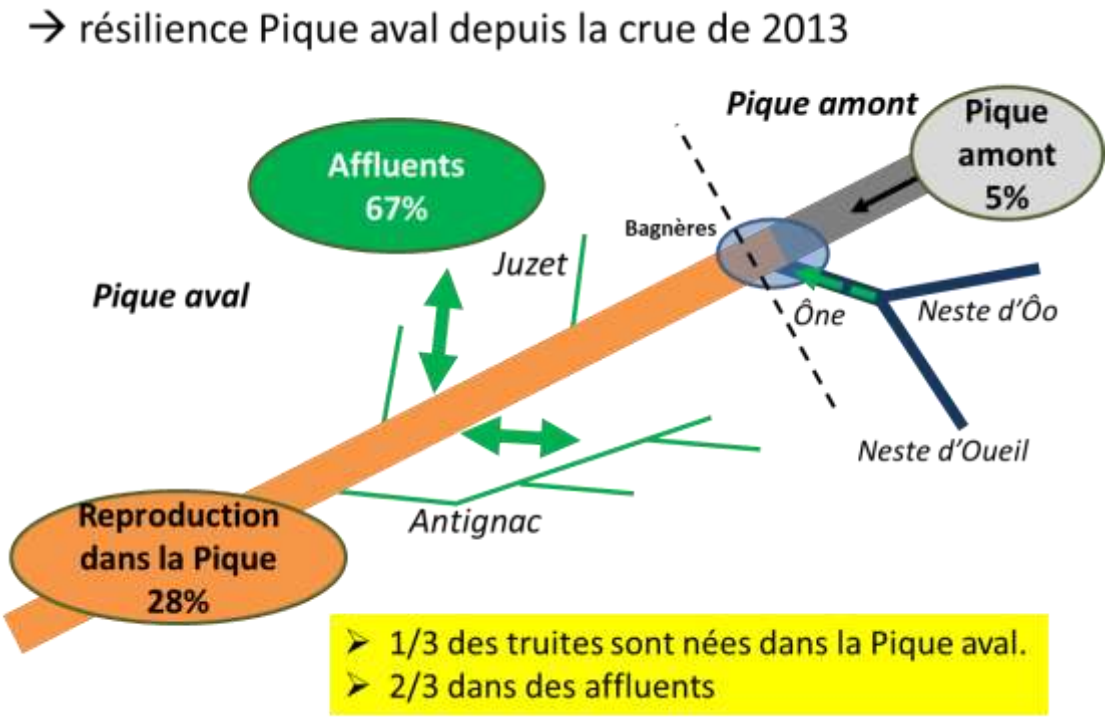


Figure 23 : hypothèse de résilience de la Pique aval suite à la crue de juin 2013.

Il existe une autre alternative pour expliquer la distribution des divers profils observés dans la Pique aval : un changement rapide du rapport isotopique dans la Pique aval sur une courte distance, en particulier à l'aval de Badech (entre Salles et Pratviel et le pont de Cier) où le ^{87}Sr:^{86}Sr devrait atteindre des valeurs entre 0.710 et 0.711 ; il devrait par contre s'en suivre une ré-augmentation du ^{87}Sr:^{86}Sr jusqu'à 0.7129 avant la confluence avec la Garonne. Une telle hypothèse nécessiterait des apports d'eau ayant un ^{87}Sr:^{86}Sr relativement faible (0.710 ou plus faible) à l'aval de Badech et la dévalaison de truites nées dans le « secteur Badech (^{87}Sr:$^{86}Sr \approx$ 0.712-0.713)» jusqu'aux sites pont de Salles et Pratviel et pont de Cier juste avant leur capture

mais pas au niveau de la base canoé qui se situe entre les deux sites précédents. Cette hypothèse apparait peu probable car elle impliquerait aussi des apports d'eau important présentant une signature isotopique élevée (>0.714) à l'aval du secteur d'étude pour engendrer une ré-augmentation importante du ^{87}Sr:^{86}Sr jusqu'à 0.7129. Des prélèvements plus rapprochés dans la Pique aval, ainsi que sur les affluents de proximité rives droite et gauche sont à envisager afin d'élucider ces hypothèses.

3.3 - Secteur C : bassin du Lys.

Une grande diversité de types de profils isotopiques a été également obtenue dans le bassin du Lys à partir des 49 truites analysées. Dans un premiers temps, nous présentons les profils détaillés de l'amont vers l'aval soit sur des sites spécifiques ou des groupes de sites (Figure 24) : 1) Enfer + Houradade + pépinière souci + pépinière Cierque (N=7); 2) Lys Aval Houradade/enfer + Auberge + amont Nougaret (N=6); 3) Lys pont d'hiver +grille tournante + Nougaret (N=7); 4) Lys pont de Cierque + Step (N=6) ; 5) Lys Exodus (N=6) ; 6) Lys pont d'Estrangouillet + aval Bonéou (N=7).

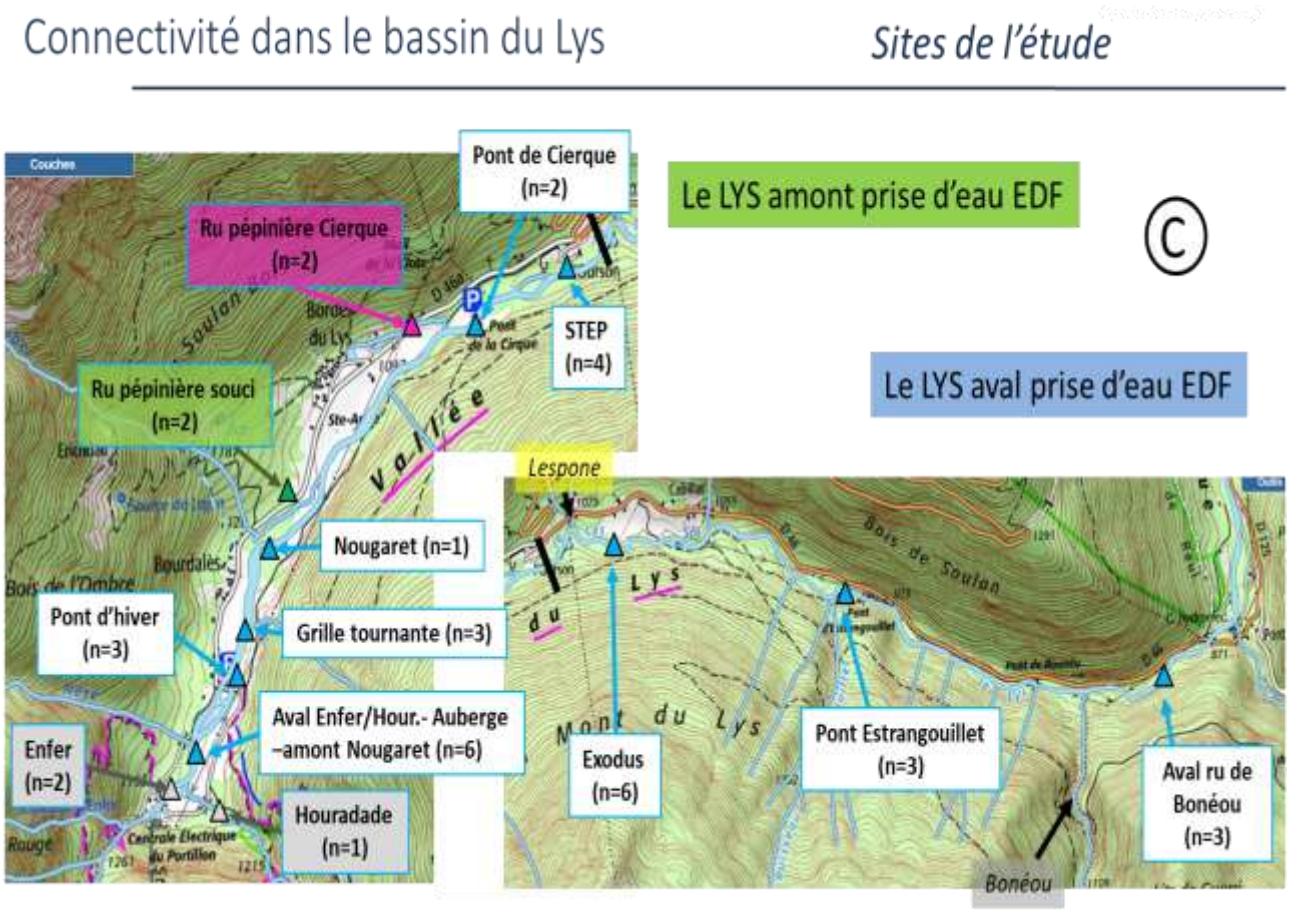


Figure 24 : localisation des sites ou groupes de sites présentés.

Sur la figure 25 sont présentés les profils isotopiques ^{87}Sr:^{86}Sr des truites collectées dans les affluents du secteur amont du Lys, i.e. Houradade, Enfer, ru pépinière « souci » et ru pépinière Cierque (aucune truite n'a été collectée dans la Coum de Nère, cependant nous disposons d'eau). Il apparait assez clairement que la partie aval échantillonnée au niveau des affluents Enfer, Houradade, et ruisseau pépinière Cierque est caractérisée par un ^{87}Sr:^{86}Sr élevé (**0.7175-0.719**), **relativement constant dans le temps et similaire pour les 3 tributaires**. Ces trois affluents sont donc à priori indiscernables les uns des autres (du moins dans leur secteur aval), il ne sera donc pas possible de déterminer une connectivité entre eux grâce au ^{87}Sr:^{86}Sr. Par contre, le **ruisseau pépinière « souci** » est quant à lui **parfaitement différencié des trois autres avec un rapport de 0.715-0.7165**. La Nère semble quant à elle similaire au ruisseau pépinière souci (0.7156).

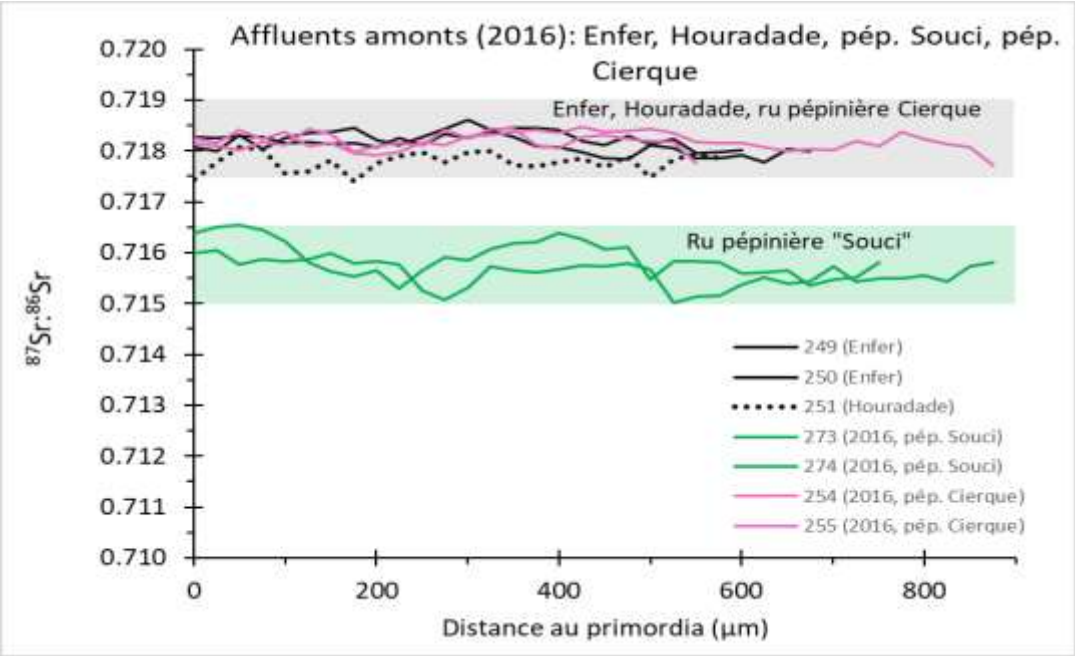


Figure 25 : types de profils rencontrés dans les affluents amont du Lys (Houradade, Enfer, ru pépinière « souci » et ru pépinière Cierque).

Les profils ^{87}Sr:^{86}Sr des truites collectées au niveau des sites situés à l'aval immédiat de la confluence Enfer/Houradade et à l'aval de la confluence du Lys avec la Nère (Auberge détruite par une avalanche) sont présentés sur la figure 26. Les fonds colorés gris et vert, qui représentent respectivement les gammes de valeurs du ^{87}Sr:^{86}Sr du groupe d'affluents Enfer/Houradade/ ru pépinière Cierque et du ruisseau pépinière « souci », ont été reportés sur la figure 25 (et les autres figures par la suite). Toutes les truites capturées dans ce secteur du Lys convergent vers une gamme de valeurs comprises entre **0.7165 et 0.7175** (zone colorée en jaune). Ces valeurs apparaissent légèrement plus faibles que celles attendues par un mélange des affluents Houradade et Enfer (>0.7175, zone grisée). Des apports d'eau de rapport isotopique plus faible comme ceux de la Coum de Nère (0.7156) et de la centrale du portillon (0.7146) pourraient en être la cause la plus plausible. Sur les six truites collectées dans ce secteur (2 en 2013 et 4 en 2016), au moins cinq semblent avoir un début de vie (100 premiers µm) distinct du secteur de capture ; quatre proviendraient des zones plus en amont (Houradade, Enfer : 55, 56, 278, 281), dont une d'un secteur encore plus en amont (^{87}Sr :^{86}Sr > 0.719 : 56), et une de la Coum de Nère ou du ruisseau pépinière « souci » (279). Le passage de ces individus dans le secteur d'étude s'est produit à priori relativement tardivement (après au moins 1 année voire plus).

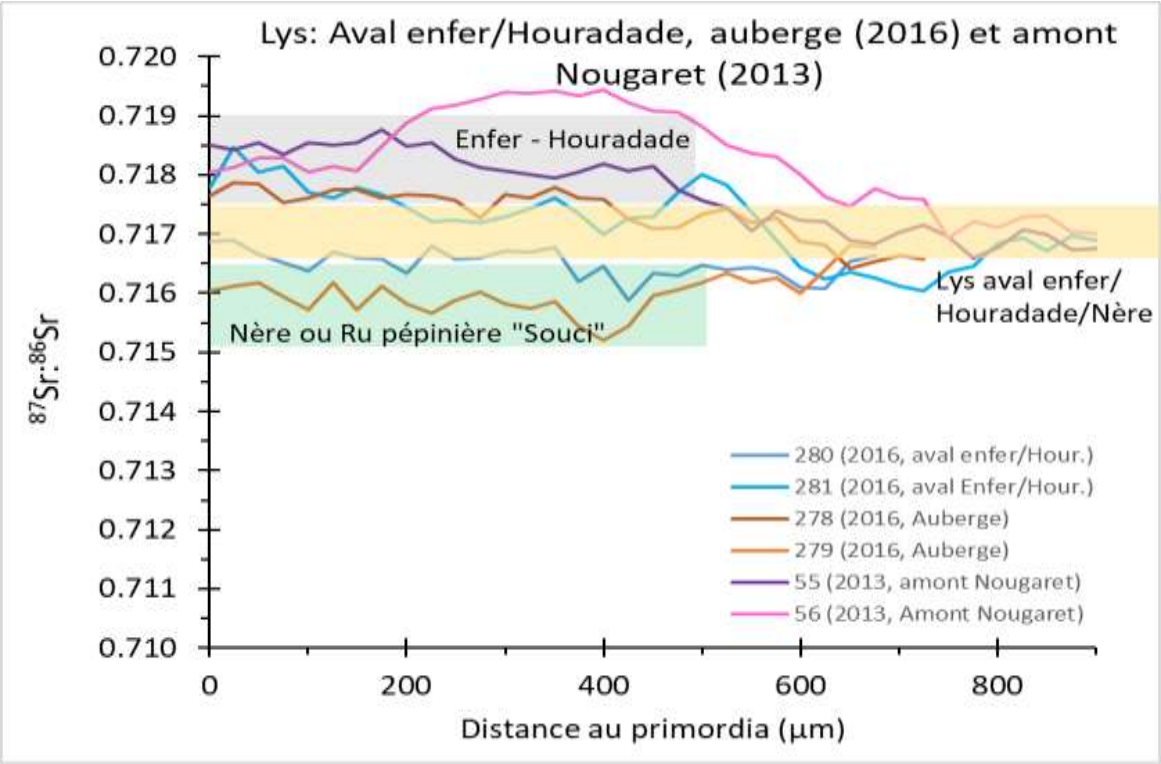


Figure 26 : types de profils rencontrés à l'aval immédiat de la confluence Enfer-Houradade et à l'aval de la confluence du Lys avec le ruisseau de Nère (site auberge et Nougaret amont).

Les profils ^{87}Sr:^{86}Sr des truites des sites pont d'hiver, grille tournante et Nougaret sont présentés sur la figure 27. Ce secteur, localisé à l'aval immédiat du secteur précédent, montre lui aussi des truites à priori de quatre origines. Une est probablement issue des affluents amonts (Houradade, Enfer : 269), une pourrait être née et s'être développée dans le secteur étudié entre le pont d'hiver et Nougaret (52), deux proviendraient de la Coume de Nère ou du ruisseau pépinière « souci » (267, 268) et enfin deux auraient pu dévaler du secteur précédent (257, 258).

Il est important de noter que la gamme de valeurs observées en fin de profil est légèrement supérieure (0.7175-0.7185) à celle du secteur précédent, et redevient quasiment équivalente à celle des affluents amonts Houradade et Enfer. La distribution ainsi observée entre les deux derniers sites, suggère que le rapport isotopique ^{87}Sr:^{86}Sr ré-augmente dans le Lys assez rapidement vers l'aval. Une explication réaliste pourrait être l'apport d'eau souterraine à fort rapport isotopique à travers le cône sédimentaire. Comme le rapport isotopique du secteur pont d'hiver – Nougaret est similaire à celui des affluents Enfer et Houradade, il n'est alors pas possible de savoir si des truites présentant des profils plats typiques du secteur sont nées dans ces deux affluents et ont dévalé directement dans ce secteur.

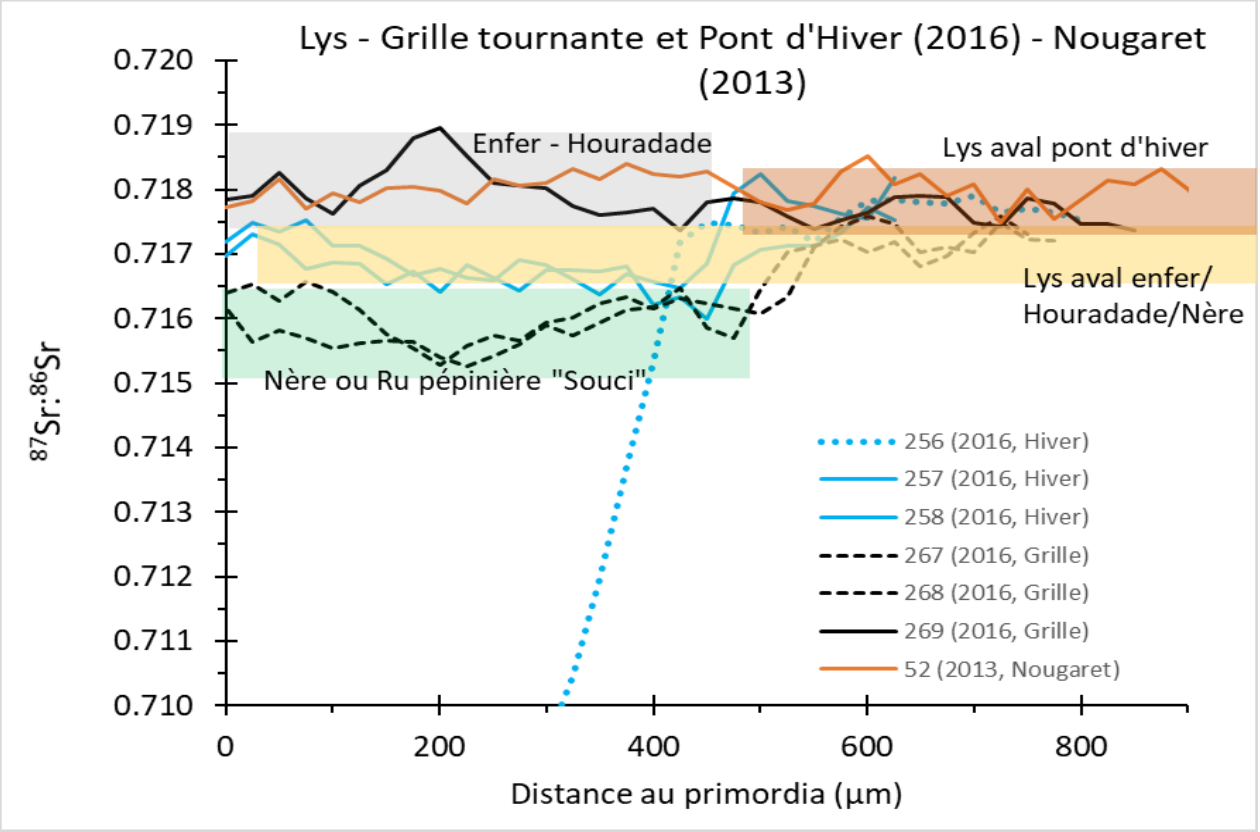


Figure 27 : types de profils rencontrés entre le pont du chemin d'hiver et le lieu-dit Nougaret.

Sur la figure 28, les deux derniers sites situés juste avant le barrage de l'Ourson (prise d'eau EDF), i.e. pont de Cierque et station d'épuration de la Mutualité, sont présentés. La gamme de valeurs isotopiques retrouvées en fin de profils sur les truites étudiées dans ce secteur est similaire à celle du secteur précédent (0.7175-0.7185), suggérant ainsi une stabilité du ^{87}Sr :^{86}Sr dans le Lys du site pont d'hiver jusqu'au barrage de l'Ourson. La grande majorité des truites présente des profils relativement plats, à l'exception d'une (263) qui est probablement originaire des affluents très en amont (Houradade, Enfer). Le fort recouvrement entre les signatures de ces affluents (du moins leurs parties aval) mais aussi du ruisseau pépinière Cierque avec celle du Lys, limite cependant la capacité du ^{87}Sr :^{86}Sr à discriminer des échanges entre ces diverses zones. Cependant, à partir de la zone centrale de l'otolithe, que ces truites ne soient pas nées toute au même endroit. Trois origines pourraient être probables : une truite proviendrait de très en amont dans un affluent de type Houradade ou Enfer (>0.719 : 263), deux (264, 266) du secteur de capture avec un rapport isotopique 0.718-0.7185 et trois (252, 253, 265) pourraient être originaire du Lys à l'aval immédiat des affluents enfer et Houradade (^{87}Sr :^{86}Sr de 0.7175)

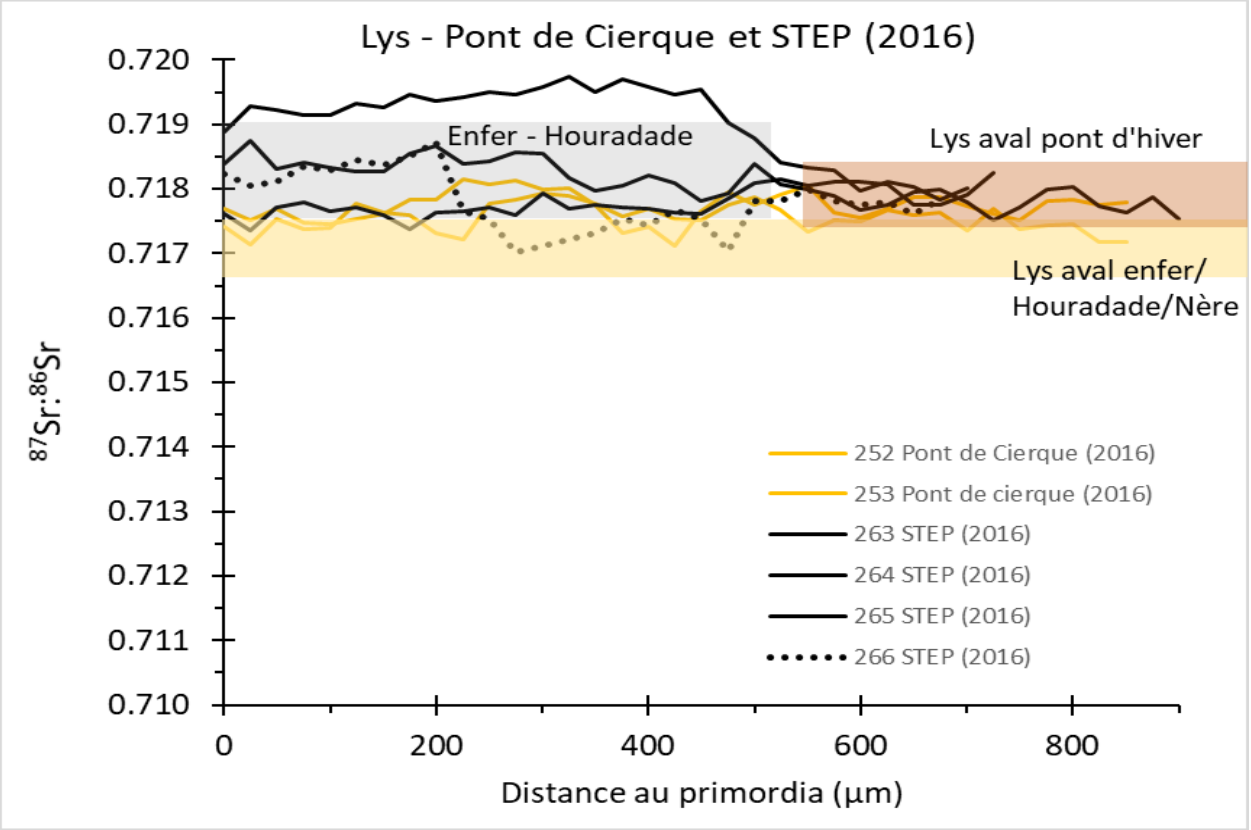


Figure 28 : types de profils rencontrés juste avant le barrage de l'Ourson, site pont de Cierque et station d'épuration de la mutualité.

Les profils isotopiques du site localisé à l'aval de la prise d'eau EDF (barrage de l'Ourson) et de la confluence Lys amont-Lespone sont présentés sur la figure 29. Les profils isotopiques de ce secteur, qui constitue un tronçon court-circuité, présentent des oscillations assez marquées entre 0.714 et 0.7165 pour les truites collectées en 2013 (courbes oranges Figure 29) et entre 0.713 et 0.7155 pour celles prélevées en 2016 (courbes noires et marrons Figure 29). A partir des analyses d'eaux collectées en septembre 2016 sur le Lys en amont du barrage de l'Ourson (0.718) et sur le ruisseau de Lespone (0.7102), nous proposons que les oscillations du ^{87}Sr :^{86}Sr sont le reflet des variations dans la contribution du Lys et du ruisseau de Lespone en liaison avec les activités hydroélectriques, la prise d'eau EDF au niveau du barrage de l'Ourson régulant très largement le débit du Lys mais pas celui de Lespone. Les valeurs faibles du ^{87}Sr :^{86}Sr reflètent les périodes durant lesquelles Lespone alimente plus largement le Lys aval (fonte des neiges précoce, pluie à faible altitude/neige à haute altitude), alors que les valeurs fortes une plus grande contribution du Lys (période d'étiage lorsque Lespone apporte peu d'eau : situation observée lors de nos prélèvements d'eau avec un rapport isotopique du Sr entre 0.7152 et 0.7164 dans le Lys aval). Parmi les six truites analysées dans ce secteur, la zone centrale de l'otolithe suggère trois origines probables, deux individus proviennent du secteur amont du Lys avec

dévalaison précoce (276) et plus tardive (53), trois probablement du secteur de capture dans le Lys aval (54,57, 275) et un d'un secteur ayant les mêmes caractéristiques isotopiques que le ruisseau Nère et pépinière souci avec un ^{87}Sr :^{86}Sr de ≈ 0.716 (peut-être un affluent comme le ruisseau d'Estrangouillet, 277).

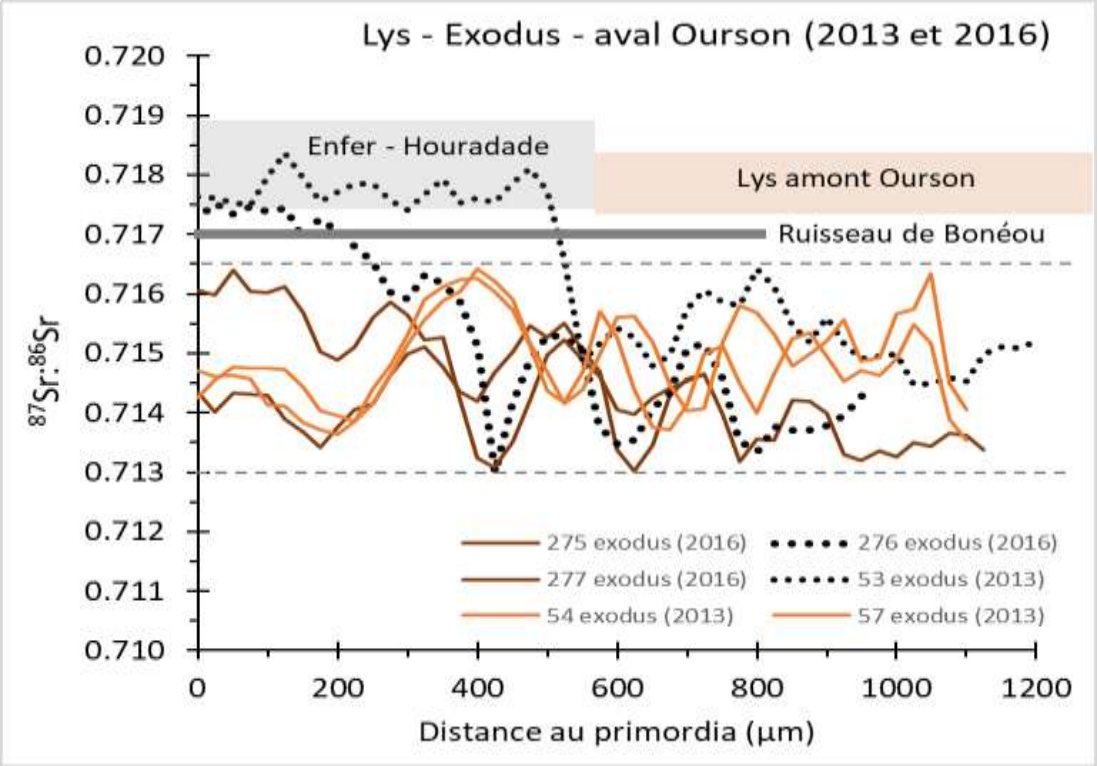


Figure 29 : types de profils rencontrés sur le site exodus à l'aval de la confluence du Lys amont avec le ruisseau de Lespone (aval barrage de l'Ourson).

Sur la figure 30 sont regroupés les profils isotopiques des sites pont d'Estrangouillet et Lys à l'aval du ruisseau de Bonéou, toujours dans le tronçon court-circuité mais plus à l'aval. Dans ce secteur, des truites ont été collectées seulement en 2016. En comparaison au site précédent, les oscillations du ^{87}Sr :^{86}Sr sont toujours présentes mais avec un décalage des valeurs faibles et fortes, le ^{87}Sr :^{86}Sr oscillant plutôt entre 0.7145 et 0.7165 contre 0.713-0.715 sur le site précédent plus en amont. Ceci pourrait s'expliquer par des apports d'eaux de rapport isotopique plus élevé comme c'est le cas avec le ruisseau de Bonéou (0.717) dans la partie aval rive droite. Parmi les sept truites analysées dans ce secteur, la zone centrale de l'otolithe suggère 3 origines probables : trois individus seraient nés dans le Lys aval au niveau des sites de captures (260, 261 et 270), deux dans le secteur précédent un peu plus en amont (exodus ? 271, 272) et un dans le ruisseau de Lespone (262). Ce dernier individu a dévalé dans le lys très rapidement

après émergence. Aucune truite née dans le ruisseau de Bonéou n'a été observée dans notre échantillonnage.

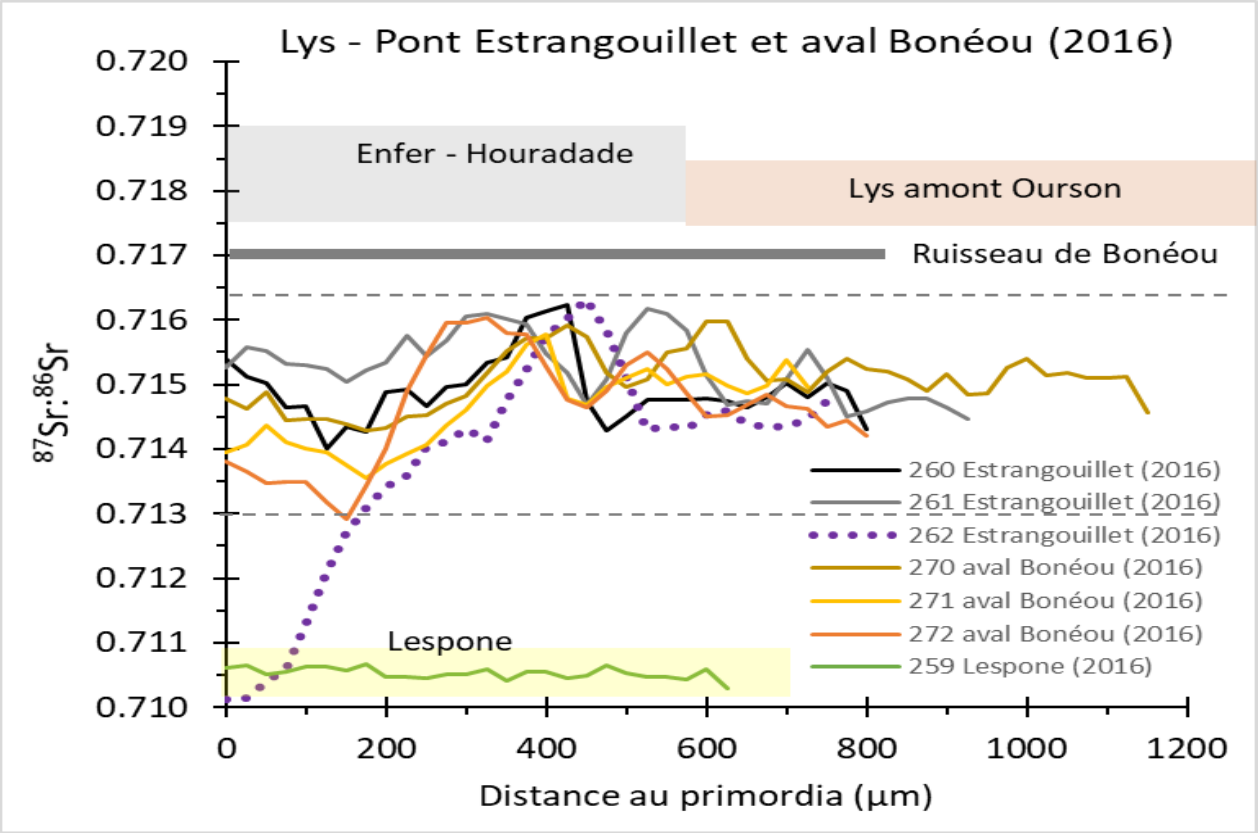


Figure 30 : types de profils rencontrés sur les sites du pont d'Estrangouillet et du Lys à l'aval du ruisseau de Bonéou.

De la même façon que pour les zones d'études précédentes A et B, nous avons établi via un outil statistique les types de profils isotopiques significativement différents grâce aux valeurs du ^{87}Sr :^{86}Sr pour ZC, M1, M2 et M3. Les valeurs de ZC, M1, M2 et M3 associées à ces profils sont présentées en Annexe 9. L'ACP et la CAH ayant permis la constitution de ces profils sont visibles en Annexes 10 et 11.

Sept profils isotopiques types ont également pu être décrits (voir Figure 31). Les zones de capture des truites associées à chaque profil isotopique type pour ce secteur sont visibles dans le Tableau 3. Globalement les type de profils sont très liés aux zones de captures présentées ci-avant.

Les profils type 1 et 2 contiennent les poissons capturés dans les affluents Enfer, Houradade et pépinière Cierque, ainsi que dans le Lys amont entre le pont d'hiver et la confluence du ruisseau de Lespone. Le profil 2 correspond à une truite de pisciculture déversée dans le Lys amont au stade alevin de printemps.

Le profil type 3 comprend l'unique truite du ruisseau de Lespone.

Les profils type 4 et 5 contiennent les truites capturées dans le secteur court-circuité aval du Lys, le type 5 correspondant à la seule truite ayant dévalé du ruisseau de Lespone dans le Lys aval.

Le profil type 6 correspond quant à lui aux individus capturés à entre l'aval de la confluence Houradade/Enfer et le pont d'hiver.

Le profil de type 7 contient principalement les truites collectées dans le ruisseau pépinière souci.

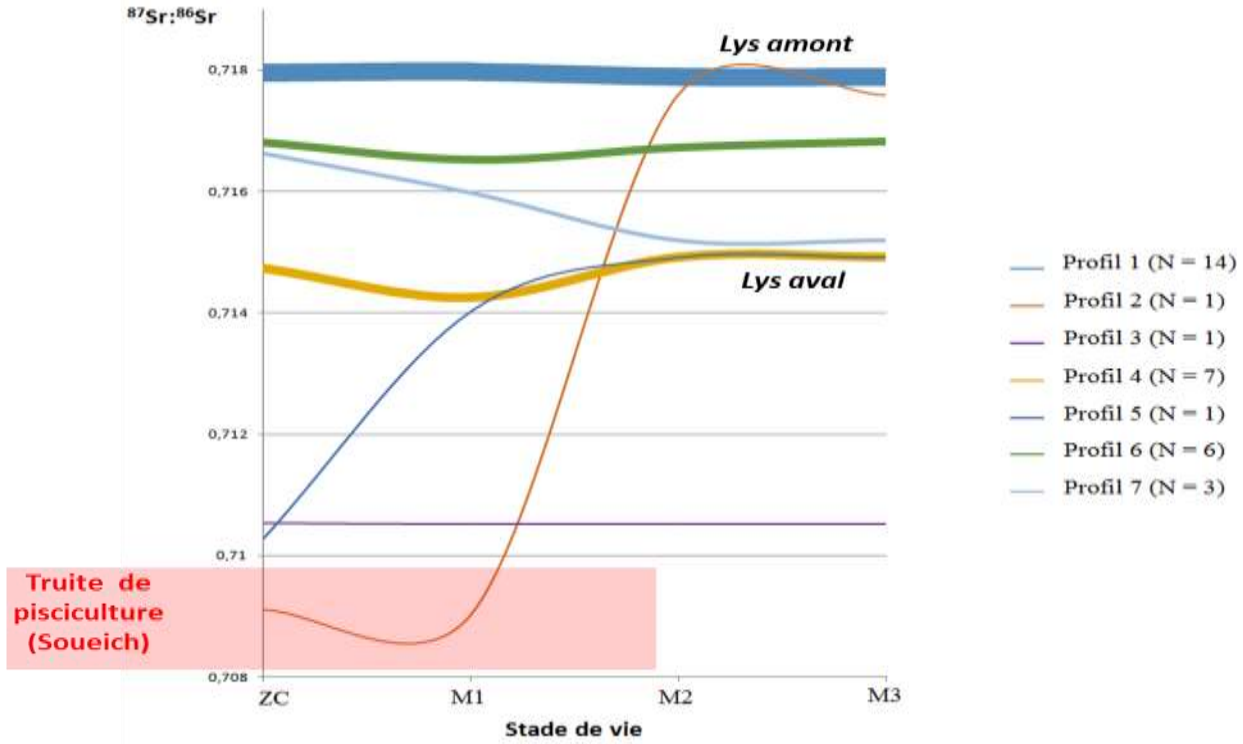


Figure 31 : types de profils isotopiques observés dans le bassin du Lys.

Dans le secteur du Lys, il apparait difficile de réaliser un schéma d'ensemble fiable de la connectivité en raison de signatures qui se superposent entre divers affluents ou secteurs géographiques du Lys. Néanmoins, il est apparu évident que sur certains sites la diversité des profils isotopiques obtenus ne peut être que le reflet de déplacements, soit rapidement après émergence des alevins soit un peu plus tardivement. Ces déplacements paraissent à première vu de courtes distances et plus dans le sens de la dévalaison, bien que certains cas de montaison puissent être aussi trouvés.

Dans le secteur aval court-circuité par les activités hydroélectriques, les oscillations du rapport isotopique sont en effet le reflet de changements dans les contributions du Lys amont et du ruisseau de Lespone. Là aussi, une importante diversité de profils en particulier au niveau de la zone centrale de l'otolithe

(origine natale) permet de supposer que les truites sont nées sur des sites différents. Les oscillations du ^{87}Sr :^{86}Sr semblent s'estomper vers l'aval du système en relation avec des apports d'affluents situés rive droite et présentant des rapports isotopiques élevés comme le ruisseau d'Estrangouillet ou de Bonéou par exemple.

Discussion

Ce travail de recherche a été conçu et mis en œuvre dans l'optique d'évaluer la pertinence et les applications possibles du rapport isotopique du Strontium ^{87}Sr:^{86}Sr dans l'étude des origines natales et des mouvements migratoires de la truite commune Salmo trutta, un poisson dulçaquicole partiellement migrateur (Cucherousset et al, 2005 ; Kallio-Nyberg et al, 2010), à des fins d'aide à la gestion. Cette étude vise également à apporter des informations relatives à l'écologie et au comportement de cette espèce présentant de grandes capacités adaptatives (Cucherousset et al, 2005), et dont la sauvegarde est pourtant menacée (Jonsson & Jonsson, 2009 ; Bret, 2016).

- **Caractéristiques des secteurs d'étude**

La partie amont du bassin de la Garonne est connue pour abriter des populations sauvages de truite fario. Ces populations sont cependant confinées à cette région, plusieurs barrages constituant des obstacles infranchissables à la montaison comme à la dévalaison. Une migration anadrome complète est donc impossible pour ces individus. Trois secteurs hydrographiques ont été définis au sein de la partie amont du bassin versant de la Garonne. Ces secteurs se distinguent par leur taille, leur anthropisation, leur connectivité et les pratiques de gestion piscicole associées. En effet, le secteur A (constitué par la Garonne amont, l'Ourse, la Neste d'Aure et le Ger) est une entité de grande superficie, incluant de l'urbanisation et de nombreux obstacles à la migration, et est sujet à de fortes éclusées en liaison avec une importante activité hydro-électrique ; le secteur B (que constitue le bassin aval de la Pique et ses affluents : bassin de l'One, Nestes d'Ôo et Oueil et chevelus tributaires) est de taille moins importante mais subit lui aussi des pressions anthropiques liées aux activités hydro-électriques. La Pique est un affluent important de la Garonne. Le secteur C (i.e. le Lys et ses ruisseaux affluents), en amont du système, est très peu impacté par l'urbanisation mais est sujet lui aussi à des perturbations liées à l'hydro-électricité et à de nombreuses pertes de connectivité, proportionnellement à sa taille restreinte. Par ailleurs, à la différence du reste de la zone d'étude, le bassin du Lys ne bénéficie d'aucune pratique officielle de gestion visant à soutenir le stock de truites fario. Ces trois zones hydrographiques sont donc autant de conditions de vie et de développement différentes pour Salmo trutta. Il importait alors de préciser le fonctionnement des populations de la région et de mettre en lien ces informations avec les caractéristiques écologiques des différents secteurs. De

plus, la région ayant subi une crue centennale en Juin 2013, l'histoire de vie des truites échantillonnées dans le cadre de cette étude apparaît comme un déterminant de la résilience de ces populations dans un tel contexte post-perturbation.

- **Utilisation du ratio $^{87}Sr:^{86}Sr$**

Le rapport isotopique du Strontium $^{87}Sr:^{86}Sr$ est un paramètre abondamment exploité pour tenter de répondre à de telles questions écologiques depuis plusieurs décennies (Campana & Thorrold, 2001 ; Barnett-Johnson et al, 2008 ; Brennan et al, 2015a), mais reste sujet à certaines difficultés d'application, notamment liées à sa variabilité dans l'espace et dans le temps (Walther & Limburg, 2012 ; Crook et al, 2013 ; Brennan et al, 2015a, 2015b). Cet outil nous est toutefois apparu comme pertinent pour répondre à ces problématiques dans ce périmètre d'étude, étant donné la diversité des valeurs de $^{87}Sr:^{86}Sr$ déjà identifiée dans la région au cours de travaux préliminaires (données non publiées LCABIE – IPREM, Bareille, 2015). Cette diversité laissait en effet supposer un bon pouvoir discriminant entre les masses d'eau du système, et donc la reconstitution de l'histoire de vie des truites par l'analyse de leurs otolithes. De plus, la signature $^{87}Sr:^{86}Sr$ de l'eau et des truites de la pisciculture de Soueich, qui alimente le système en truites fario alevinées dans le périmètre d'étude, se démarque des cours d'eau environnants, rendant possible l'identification des truites issues de l'alevinage. De manière générale, le rapport isotopique du Strontium d'une rivière donnée dépend de celui des masses d'eau affluentes et de leurs débits (Muhlfeld et al, 2012 ; Walther & Limburg, 2012), ainsi que de la géologie sous-jacente à l'ensemble des sources en amont (Barnett-Johnson et al, 2008). Les résultats obtenus au cours de ce travail ont confirmé l'importante variabilité spatiale du ratio $^{87}Sr:^{86}Sr$ des eaux de surface dans le périmètre d'étude. Nous montrons ici que cette variabilité n'est pas dépendante de la taille du système hydrographique étudié : de petits bassins comme celui du Lys peuvent présenter des valeurs ponctuelles de $^{87}Sr:^{86}Sr$ très différentes comme redondantes entre stations. Cette redondance peut dans certains cas rendre difficile l'identification de l'histoire de vie d'un poisson. D'autre part, la variabilité temporelle du ratio $^{87}Sr:^{86}Sr$ est induite par des processus difficilement prédictibles et généralement système-dépendants (Brennan et al, 2015b). Ainsi, bien que certains auteurs aient reportés une stabilité temporelle du ratio $^{87}Sr:^{86}Sr$ à des échelles saisonnières (Kennedy et al, 2000 ; Muhlfeld et al, 2012) ou interannuelles (Barnett-Johnson et al, 2008), on ne peut en aucun cas statuer sur la stabilité du ratio $^{87}Sr:^{86}Sr$ dans un système donné sans le vérifier sur une longue période. Cependant, les données recueillies dans le cadre de ce travail sont cohérentes avec des données

antérieures, collectées aux mêmes stations (données non publiées LCABIE – IPREM, Bareille, 2015 ; Semhi et al, 2000), et les profils isotopiques des truites prélevées à la pisciculture de Soueich en 2013 suggèrent une variation temporelle du ratio ^{87}Sr:^{86}Sr pour les eaux du Ger existante, mais non rédhibitoire pour une étude de provenance. Nous avons donc assumé dans l'interprétation de nos résultats la possibilité de relier les valeurs de ^{87}Sr:^{86}Sr des otolithes des truites aux valeurs de ^{87}Sr:^{86}Sr mesurées dans les cours d'eau « à un instant t ».

- **Origine natale des truites fario**

Pour un grand nombre de truites échantillonnées dans le cadre de cette étude, leur origine natale (reproduction naturelle ou alevinage) a pu être déterminée par la valeur moyenne du ^{87}Sr :^{86}Sr mesuré dans la zone centrale de leurs otolithes (ZC). Pour quelques individus seulement, du secteur A, il fut en revanche impossible de conclure quant à leur origine pisciculture ou sauvage, certains pouvant être nés de reproduction naturelle dans le Ger (dont la signature ^{87}Sr:^{86}Sr correspond à celle de la pisciculture de Soueich), et d'autres dans l'Ourse (dont la signature ^{87}Sr:^{86}Sr en est proche). Ces incertitudes ont été levées en croisant des données de génétique menée sur les mêmes individus. Ceci souligne l'importance d'un échantillonnage exhaustif pour une étude de ce type, un échantillonnage incomplet pouvant en effet induire des erreurs dans la détermination de la provenance des individus. Elles montrent également que l'utilisation du ratio ^{87}Sr:^{86}Sr présente des limites, et que d'autres outils comme la génétique pourraient apporter un complément d'informations, notamment pour identifier des individus alevinés, souvent issus de lignées génétiques connues.

Au bilan, la proportion de truites originaires du soutien aux effectifs apparaît très contrastée entre le secteur de la Garonne aval (>70%), la Garonne amont (<10%) et son affluent la Pique (<10%). Ceci démontre une **efficacité différenciée de l'alevinage selon les secteurs**. Ce contraste entre secteurs pourrait témoigner de **différences importantes dans la survie de la souche sauvage et donc dans la compétition entre individus sauvages et alevinés**.

Grâce au ^{87}Sr:^{86}Sr en M1 (i.e. le ^{87}Sr:^{86}Sr incrémenté à partir de l'émergence), il a était possible de déterminer à quel stade de vie les poissons de pisciculture ont été introduits dans le milieu naturel. En effet, ceux ayant été déversés au stade alevin auront incorporé en M1 des valeurs de ^{87}Sr:^{86}Sr parfaitement identiques à celles incorporées en ZC, contrairement à ceux déversés au stade œuf, qui auront enregistré en M1 la signature ^{87}Sr:^{86}Sr du cours d'eau où ils ont été introduits. Parmi les truites de pisciculture pour lesquelles le stade de déversement a pu

être caractérisé (N=29), nous avons retrouvé à des niveaux comparables des truites déversées au stade truitelle d'automne (N=10) ou alevin de printemps (N=12), celles issues de déversement au stade œuf ou alevin vésiculé étant un peu moins représentées (N=7).

- **Histoires de vie des truites fario**

La deuxième partie de l'étude avait pour but de tenter de retracer l'histoire de vie et les éventuels mouvements des truites de la région. Les profils isotopiques types obtenus à partir des valeurs de ^{87}Sr:^{86}Sr mesurées dans les otolithes montrent qu'il existe une diversité d'histoires de vie au sein des populations. Certains profils isotopiques sont composés de valeurs **^{87}Sr:^{86}Sr relativement constantes, indiquant que les individus correspondants n'auraient pas réalisé de déplacements** entre plusieurs « **entités isotopiques** ». Dans d'autres cas, une **variabilité temporelle du ^{87}Sr:^{86}Sr a été observé suggérant des mouvements entre « entités isotopiques »** puisque des truites présentant des profils constants ont été conjointement observées sur un même site.

Dans le secteur Garonne, il apparaît de la lecture de ces profils isotopiques que les truites qui ont réalisées des déplacements sont issues aussi bien d'origine pisciculture que sauvage. Dans l'ensemble, sur ce secteur seulement **17%** des truites se sont à priori déplacées.

A l'inverse de la Garonne, il ne semble pas que cela a été le cas dans la Pique aval, du moins pour la cohorte post-crue 2013. En effet, dans ce secteur 72% des poissons collectés présentent soit un changement de milieu isotopique évident ou soit un profil isotopique qui ne colle pas avec la signature isotopique du site de capture. Dans ce dernier cas, cela peut être dû à un déplacement sur le site de capture peu de temps avant la collecte. Il n'a pas été cependant possible d'attribuer à coup sûr l'affluent ou le ruisseau d'origine pour certains individus. Compte tenu de la distribution amont-aval de différentes signatures isotopiques des truites s'étant déplacées dans la pique aval, nous avons émis l'hypothèse qu'il s'agissait d'une alimentation de proximité par des ruisseaux se jetant dans le secteur d'étude. Cette hypothèse a pu être validée pour ce qui concerne l'alimentation par le ruisseau de Juzet en rive droite, mais reste encore à démontrer pour d'autres affluents de la rive droite et gauche (Antignac, ….). Une autre alternative pourrait être une dévalaison de l'amont du secteur d'étude et plus particulièrement des affluents plus importants que sont les Nestes d'Ôo et d'Oueil, l'Ône (mélange des deux Nestes) et la Pique amont. Si nous avons pu confirmer avec certitude une contribution de la Pique amont, celle-ci reste faible (5%). Pour ce qui est de la Neste d'Ôo et de

l'Ône, des recouvrements de signatures limitent pour le moment notre capacité à trancher. En ce qui concerne la Neste d'Oueil, très peu de profils semblent correspondre à cet affluent, suggérant ainsi que sa contribution serait de toute façon également faible (<5%). On peut penser que la Neste d'Ôo et l'Ône contribuent également peu, ou du moins dans les mêmes proportions que la Pique amont et la Neste d'Oueil. L'analyse en cours de la signature isotopique du ruisseau d'Antignac permettra peut-être d'affiner notre hypothèse.

Enfin, si des recouvrements de signatures réduisent notre capacité à déterminer la connectivité dans ce bassin très en amont, la diversité de profils isotopiques retrouvée sur certains sites témoigne de déplacements pour certains individus. Il a été possible de mettre en évidence des déplacements concrets dans certains, le plus souvent par dévalaison mais parfois en montaison aussi. Globalement, il semble que ces déplacements soient réalisés sur de courtes distances.

- **Stratégies adaptatives et résilience**

D'une manière générale, les individus ayant visité plusieurs milieux distincts pour le ^{87}Sr:^{86}Sr au cours de leur vie ont réalisé leurs déplacements majoritairement de l'amont vers l'aval. Certaines truites semblent être nées dans des petits cours d'eau tributaires et auraient dévalé jusqu'à atteindre le cours d'eau principal du système (i.e. la Garonne, la Pique ou le Lys). D'autres, nées dans le cours d'eau principal, y sont restés mais ont pu se déplacer vers l'aval tout en restant dans l'axe principal de la rivière. Ces mouvements peuvent avoir été faits de manière active (fuite d'une compétition induite par une surdensité de population, recherche de meilleures conditions écologiques) ou passive (dévalaison involontaire dans le cas de hausses de débits trop importantes).

Les truites collectées dans le cadre de cette étude étaient majoritairement dans leur troisième cycle de vie (2+) et font donc partie de la génération postérieure à la crue centennale de 2013. Cet événement extrême s'est traduit par une très forte hausse des débits, une destruction importante des berges et un remodelage intensif du lit principal, dont la conséquence a été une réduction marquée des effectifs des populations de Salmo trutta, surtout dans les bassins de la Garonne amont et de la Pique. Une différence apparaît cependant entre la Garonne et son affluent la Pique suite à l'évènement catastrophique de 2013. Dans le cas de la Pique, la résilience est intervenue grâce à la population sauvage exclusivement, malgré de gros efforts d'alevinage. Les truites sauvages ont eu à priori la capacité de s'adapter à l'évènement

catastrophique de juin 2013 en colonisant les ruisseaux de petites tailles ou par reproduction des individus résidents dans ces ruisseaux au moment de la crue. Un fonctionnement basé sur le petit chevelu local pourrait être aussi celui qui prévaut en conditions normales (déjà observé dans la littérature) en raison des perturbations liées à l'hydroélectricité et la fragmentation du milieu, mais cela restera à vérifier lorsque la Pique aura atteint à nouveau un état d'équilibre. Les effectifs de la Garonne à l'aval de la confluence avec la Pique semblent plus largement reposer sur le soutien aux effectifs, suggérant une faible fonctionnalité et efficacité de la reproduction naturelle dans cet axe. La montée du niveau des eaux lors de la crue de 2013 a dû être moins extrême dans les ruisseaux et les petites rivières tributaires de la Pique. Ainsi, une telle perturbation aurait induit une sélection en faveur des individus de ces hydrosystèmes, qui auraient donc joué un rôle primordial dans la résilience des populations de ce secteur. Ces petites entités hydrographiques doivent donc faire l'objet d'une gestion adaptée pour favoriser la pérennité d'une espèce comme Salmo trutta dans ce type d'écosystème. Par ailleurs, les pratiques de réintroduction de cette espèce apparaissent moins efficaces dans le secteur de la Pique aval, probablement en raison d'une bonne abondance de la souche sauvage.

Conclusion

Ce travail confirme les apports de l'analyse du rapport isotopique du Strontium (^{87}Sr:^{86}Sr) pour des problématiques touchant à l'écologie halieutique, et montre que cette démarche peut être informative dans des hydrosystèmes de tailles variables pour décrire l'origine natale et l'histoire de vie d'individus d'une espèce comme la truite commune Salmo trutta. Les résultats obtenus soulignent la nécessité de caractériser la géochimie des cours d'eau étudiés en préalable de l'interprétation des otolithes comme marqueurs de déplacements dans l'hydrosystème d'intérêt.

Il apparaît ici que les proportions d'individus 2+ nés de reproduction artificielle (en pisciculture) varient très largement selon les bassins étudiés. En effet, alors que la **Garonne aval voit ses effectifs âgés de plus de 2 ans bénéficier de manière importante de l'alevinage (>70%)**, les truites de la Garonne amont et du bassin de la **Pique sont très majoritairement issues de la reproduction naturelle (>95%)**. Ce dernier secteur soumis à l'alevinage, serait donc plus fonctionnel, et la compétition entre les deux souches serait en faveur de la souche sauvage.

La truite fario est un organisme partiellement migrateur, et une part non négligeable d'individus « mobiles » a été mise en lumière en particulier dans les secteurs Pique et Lys. Cependant, ces mouvements se traduisaient souvent par des dévalaisons depuis un ruisseau tributaire voisin de l'axe principal de la rivière, une stratégie qui pourrait avoir favorisé la résilience des populations de la région après la crue dévastatrice de 2013. Les mouvements migratoires sur de plus grandes distances semblent toutefois assez rares.

En termes d'application à la gestion de cette espèce, ces résultats vont donc en faveur d'une poursuite des pratiques de soutien au stock dans la Garonne aval (partie à l'aval de la confluence avec la Pique). A l'inverse, ils mettent en avant la faible efficacité de ces pratiques dans le bassin de la Pique et pose la question de leur utilité. Enfin, la fonctionnalité de ces milieux pourrait probablement être améliorée en intensifiant les pratiques de gestion consacrées au maintien de bonnes conditions écologiques dans les ruisseaux tributaires, qui servent de refuges en cas d'événements extrêmes et de sites de reproduction permettant d'alimenter le reste du système en effectifs.

Bacon, C.R. et al, 2004. Migration and rearing histories of Chinook salmon (Oncorhynchus tshawytscha) determined by ion microprobe Sr isotope and Sr/Ca transects of otoliths. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 61(12), pp.2425–2439.

Balcaen, L., Moens, L. & Vanhaecke, F., 2010. Determination of isotope ratios of metals (and metalloids) by means of inductively coupled plasma-mass spectrometry for provenancing purposes - A review. Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy, 65(9-10), pp.769–786.

Barnett-Johnson, R. et al, 2008. Tracking natal origins of salmon using isotopes, otoliths, and landscape geology. Limnol. Oceanogr., 53(4), pp.1633–1642.

Barnett-Johnson, R., Teel, D.J. & Casillas, E., 2010. Genetic and otolith isotopic markers identify salmon populations in the Columbia River at broad and fine geographic scales. Environmental Biology of Fishes, 89(3), pp.533–546.

Brennan, S.R. et al, 2015. Strontium isotopes delineate fine-scale natal origins and migration histories of Pacific salmon. Science Advances, 1, p.e1400124.

Brennan, S.R. et al, 2015. Strontium isotopes in otoliths of a non-migratory fish (slimy sculpin): Implications for provenance studies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 149, pp.32–45.

Bret, V., 2016. Dynamique spatio-temporelle des populations de truites en milieu naturel et au voisinage des ouvrages hydro électriques. Thèse – Université de Lyon, 197p.

Campana, S.E. & Neilsson, J.D., 1985. Microstructure of Fish Otoliths. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 42, pp.1014-1032.

Campana, S.E. & Thorrold, S.R., 2001. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 58(1), pp.30–38.

Crook, D.A. et al, 2013. Recruitment sources and dispersal of an invasive fish in a large river system as revealed by otolith chemistry analysis. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 70(7), pp.953–963.

Cucherousset, J. et al, 2005. A continuum of life history tactics in a brown trout (Salmo trutta) population. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 62(7), pp.1600–1610.

Dudgeon, D. et al, 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. Biological Reviews, 81(02), p.163.

Hegg, J.C., Giarrizzo, T. & Kennedy, B.P., 2015. Diverse early life-history strategies in migratory Amazonian catfish: Implications for conservation and management. PLoS ONE, 10(7), pp.1–20.

Hobson, K.A., Barnett-Johnson, R. & Cerling, T., 2010. Using Isoscapes to Track Animal Migration. Isoscapes: Understanding Movement, Pattern, and Process on Earth Through Isotope Mapping, pp.273-298.

Jonsson, B. & Jonsson, N., 2009. A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon Salmo salar and brown trout Salmo trutta, with particular reference to water temperature and flow. Journal of Fish Biology, 75(10), pp.2381–2447.

Kallio-Nyberg, I. et al, 2010. Can the lost migratory Salmo trutta stocks be compensated with resident trout stocks in coastal rivers? Fisheries Research, 102(1-2), pp.69–79.

Kennedy, B.P. et al, 1997. Natural isotope markers in salmon. Nature, 000062, pp.766–767.

Kennedy, B.P. et al, 2000. Using natural strontium isotopic signatures as fish markers: methodology and application. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 57(11), pp.2280–2292.

Kennedy, B.P. et al, 2002. Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes in otoliths. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 59, pp.925–929.

Kinnison, M.T., Unwin, M.J. & Quinn, T.P., 2003. Migratory costs and contemporary evolution of reproductive allocation in male Chinook salmon. Journal of Evolutionary Biology, 16(6), pp.1257–1269.

Klemetsen, A. et al, 2003. Atlantic salmon Salmo salar L., brown trout Salmo trutta L. and Arctic charr Salvelinus alpinus (L.): a review of aspects of their life histories. Ecology of Freshwater Fish, 12(1), pp.1–59.

Loewen, T.N. et al, 2015. Discrimination of northern form Dolly Varden Char (Salvelinus malma malma) stocks of the North Slope, Yukon and Northwest Territories, Canada via otolith trace elements and $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotopes. Fisheries Research, 170, pp.116–124.

Martin, J., 2013. Développement de la microchimie élémentaire et isotopique (87Sr : 86Sr) des otolithes de saumon Atlantique : évaluation du potentiel pour un appui à la gestion piscicole dans le bassin de l ’Adour. Thèse – Université de Pau et des Pays de l’Adour, 222p.

McDowall, R.M., 1999. Different kinds of diadromy: Different kinds of conservation problems. ICES J. Mar. Sci., 56(4), pp.410–413.

Muhlfeld, C.C. et al, 2012. Estimating westslope cutthroat trout (Oncorhynchus clarkii lewisi) movements in a river network using strontium isoscapes. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 69, pp.906–915.

Olley, R. et al, 2011. Recruitment sources of brown trout identified by otolith trace element signatures. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 45(December), pp.395–411.

Popper, A.N., Ramcharitar, J. & Campana, S.E., 2005. Why otoliths? Insights from inner ear physiology and fisheries biology. Marine and Freshwater Research, 56(5), pp.497–504.

Runge, C.A. et al, 2014. Conserving mobile species. Frontiers in Ecology and the Environment, 12(7), pp.395–402.

Schinegger, R. et al, 2016. Untangling the effects of multiple human stressors and their impacts on fish assemblages in European running waters. Science of the Total Environment, 573, pp.1079–1088.

Semhi, K., Clauer, N. & Probst, J.L., 2000. Strontium isotope compositions of river waters as records of lithology-dependent mass transfers: The Garonne river and its tributaries (SW France). Chemical Geology, 168(3-4), pp.173–193.

Walther, B.D., Thorrold, S.R. & Olney, J.E., 2008. Geochemical Signatures in Otoliths Record Natal Origins of American Shad. Transactions of the American Fisheries Society, 137(1), pp.57–69.

Walther, B.D. et al, 2011. Movements of Diadromous Fish in Large Unregulated Tropical Rivers Inferred from Geochemical Tracers. PLoS ONE, 6(4).

Walther, B.D. & Limburg, K.E., 2012. The use of otolith chemistry to characterize diadromous migrations. Journal of Fish Biology, 81(2), pp.796–825.

Ward, R.D. & Grewe, P.M., 1994. Appraisal of molecular-genetic techniques in fisheries. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 4(3), pp.300–325.

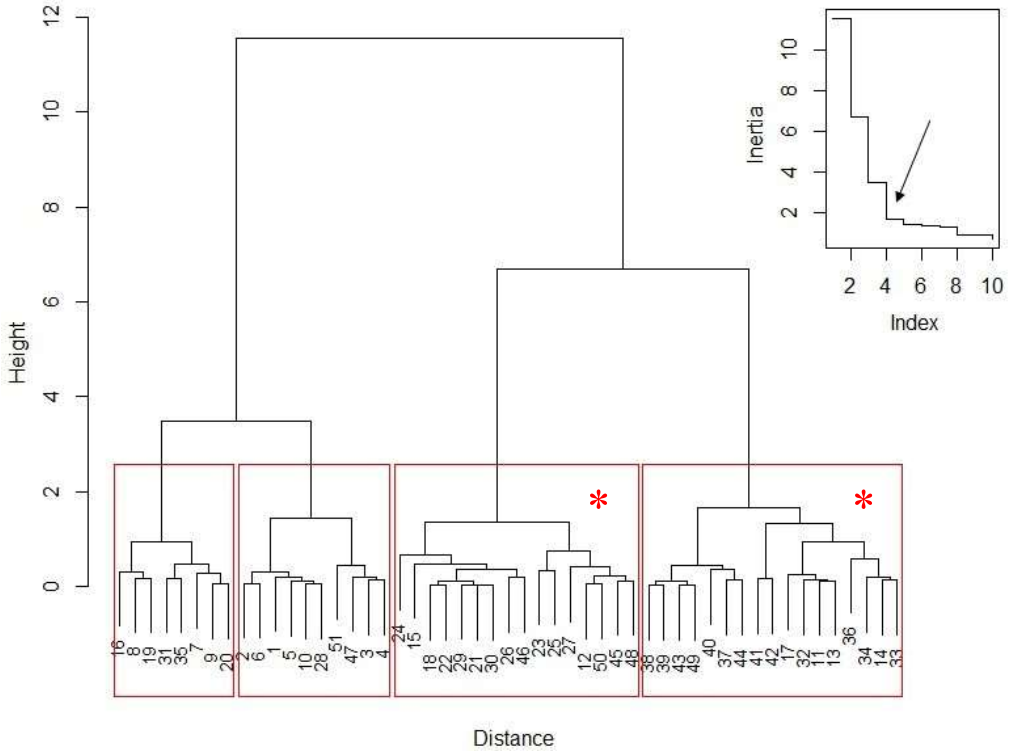
Webster, M.S. et al, 2002. Links between worlds: Unraveling migratory connectivity. Trends in Ecology and Evolution, 17(2), pp.76–83.

Wilcove, D.S. & Wikelski, M., 2008. Going, going, gone: Is animal migration disappearing? PLoS Biology, 6(7), pp.1361–1364.

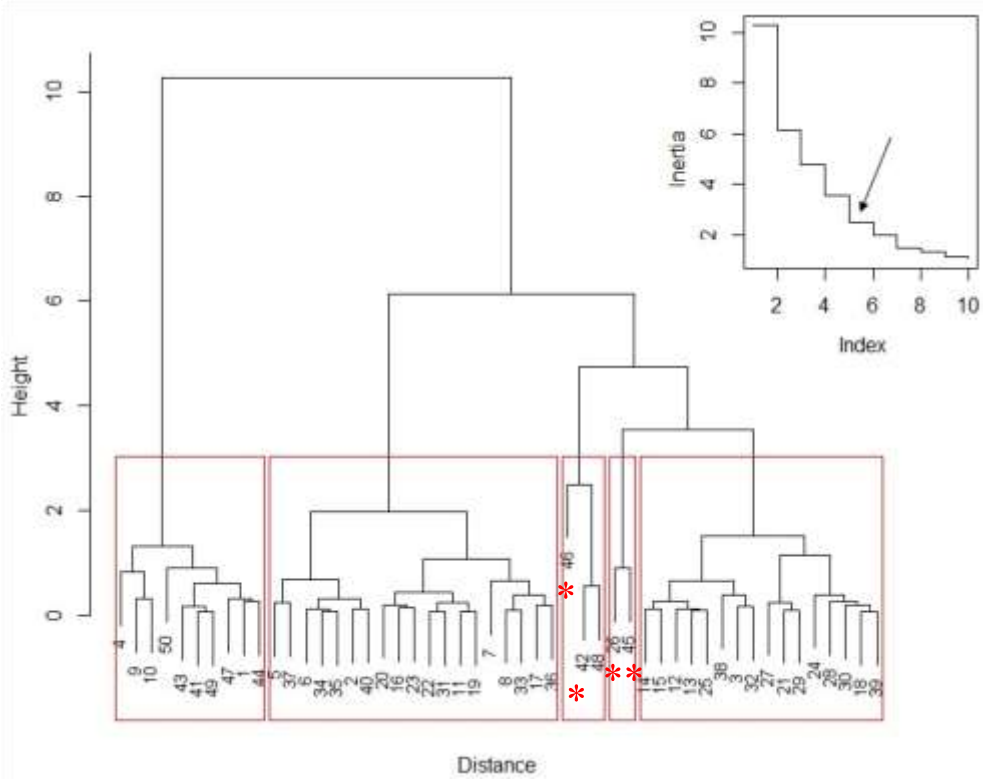
Wolff, B.A. et al, 2012. Origins of invasive piscivores determined from the strontium isotope ratio (87 Sr / 86 Sr) of otoliths. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 69(SEPTEMBER 2011), pp.724–739.

Zimmerman, C.E. et al, 2013. Species and Life History Affect the Utility of Otolith Chemical Composition for Determining Natal Stream of Origin for Pacific Salmon. Transactions of the American Fisheries Society, 142(5), pp.1370–1380.

Zitek, A. et al, 2010. Discrimination of wild and hatchery trout by natural chronological patterns of elements and isotopes in otoliths using LA-ICP-MS. Fisheries Management and Ecology, 17(5), pp.435–445.



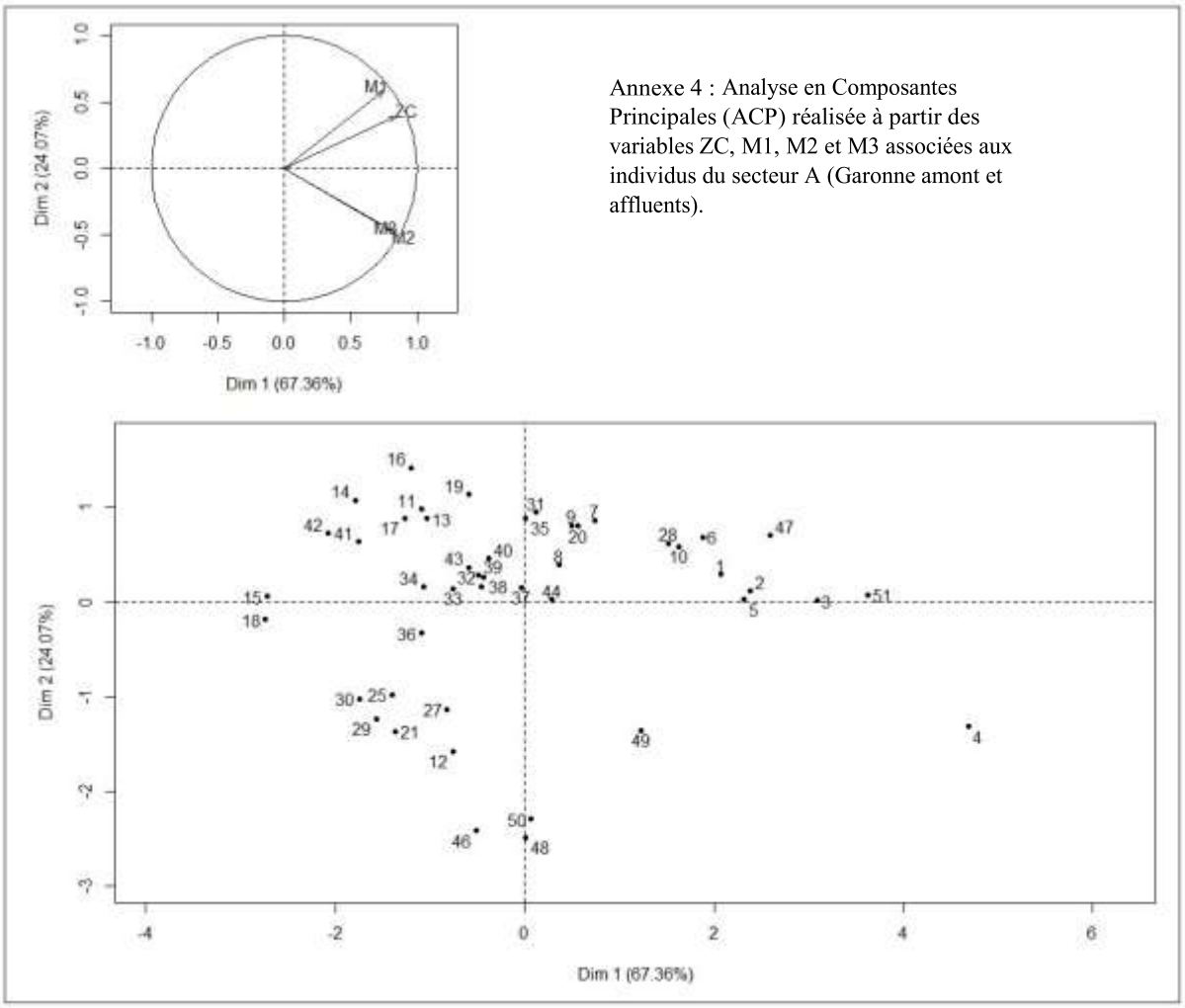
Annexe 1 : Dendrogramme obtenu par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisée à partir des coordonnées de l'ACP sur les variables ZC et M1 des individus du secteur A (Garonne amont et affluents). Les 4 clusters apparaissent encadrés en rouge ; les clusters composés d'individus supposés issus de l'alevinage sont marqués d'une étoile*.



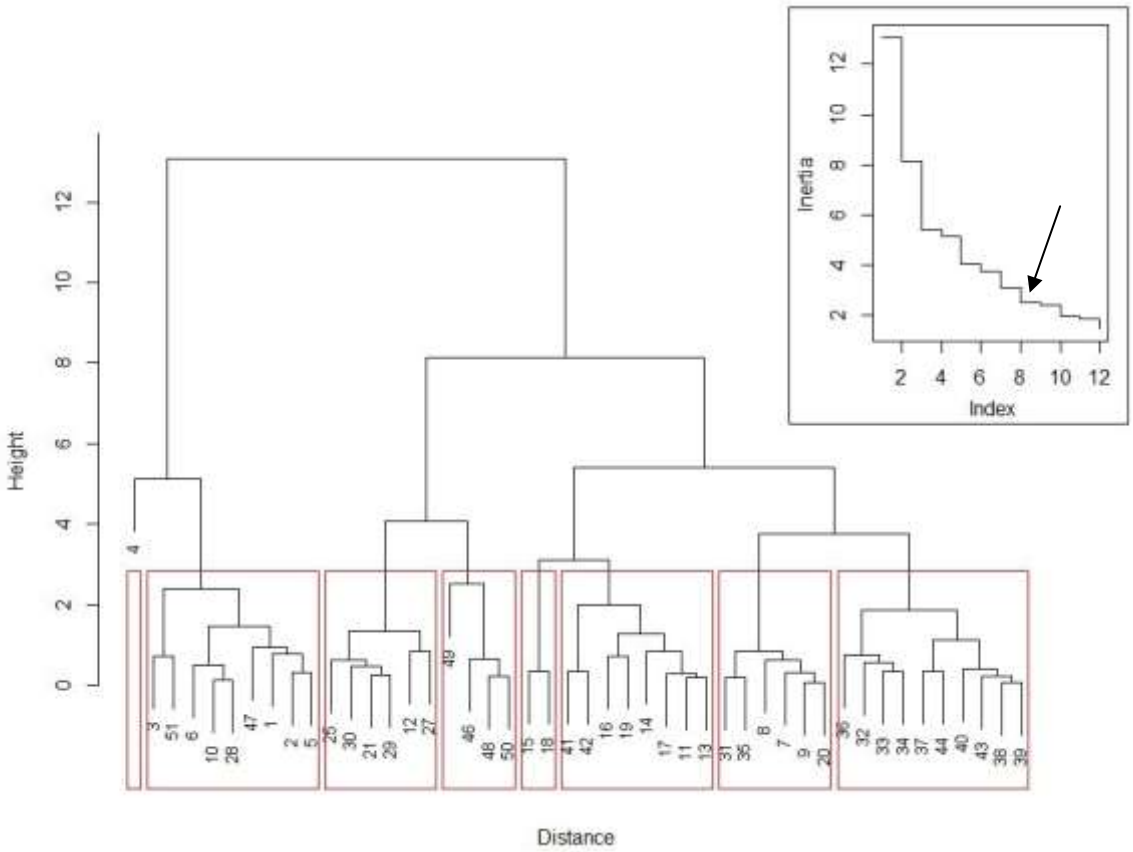
Annexe 2 : Dendrogramme obtenu par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisée à partir des coordonnées de l'ACP sur les variables ZC et M1 des individus du secteur B (Pique et affluents). Les 5 clusters apparaissent encadrés en rouge ; les individus possiblement issus de l'alevinage sont marqués d'une étoile*.

Annexe 3 : Valeurs moyennes ± SD du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des individus Salmo trutta des différents clusters aux quatre stades de vie (ZC, M1, M2 et M3) et effectifs des clusters pour le secteur A (Garonne amont et affluents).

Cluster	ZC	M1	M2	M3	Effectif
1	0.71245 ± 0,00033	0.71234 ± 0.00040	0.71244 ± 0.00042	0.71232 ± 0.00032	9
2	0.71280	0.71276	0.71585	0.71249	1
3	0.71143 ± 0.00025	0.71137 ± 0.00022	0.71147 ± 0.00013	0.71147 ± 0.00013	6
4	0.70986 ± 0.00090	0.71078 ± 0.00015	0.71078 ± 0.00015	0.71078 ± 0.00015	5
5	0.70901 ± 0.00033	0.70888 ± 0.00022	0.71165 ± 0.00039	0.71152 ± 0.00014	6
6	0.70856 ± 8.40^{e}-5	0.70893 ± 0.00029	0.71062 ± 4.43^{e}-5	0.71062 ± 4.43^{e}-5	5
7	0.70951 ± 0.00024	0.71108 ± 0.00057	0.71142 ± 0.00017	0.71142 ± 0.00017	10
8	0.70910 ± 0.00025	0.70943 ± 0.00129	0.71248 ± 0.00014	0.71248 ± 0.00014	4
				Total	46



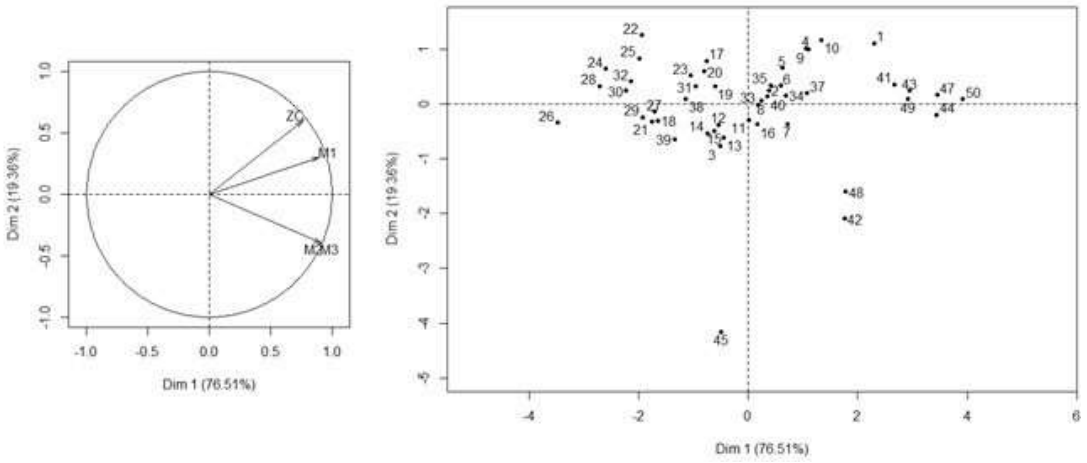
Annexe 4 : Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée à partir des variables ZC, M1, M2 et M3 associées aux individus du secteur A (Garonne amont et affluents).



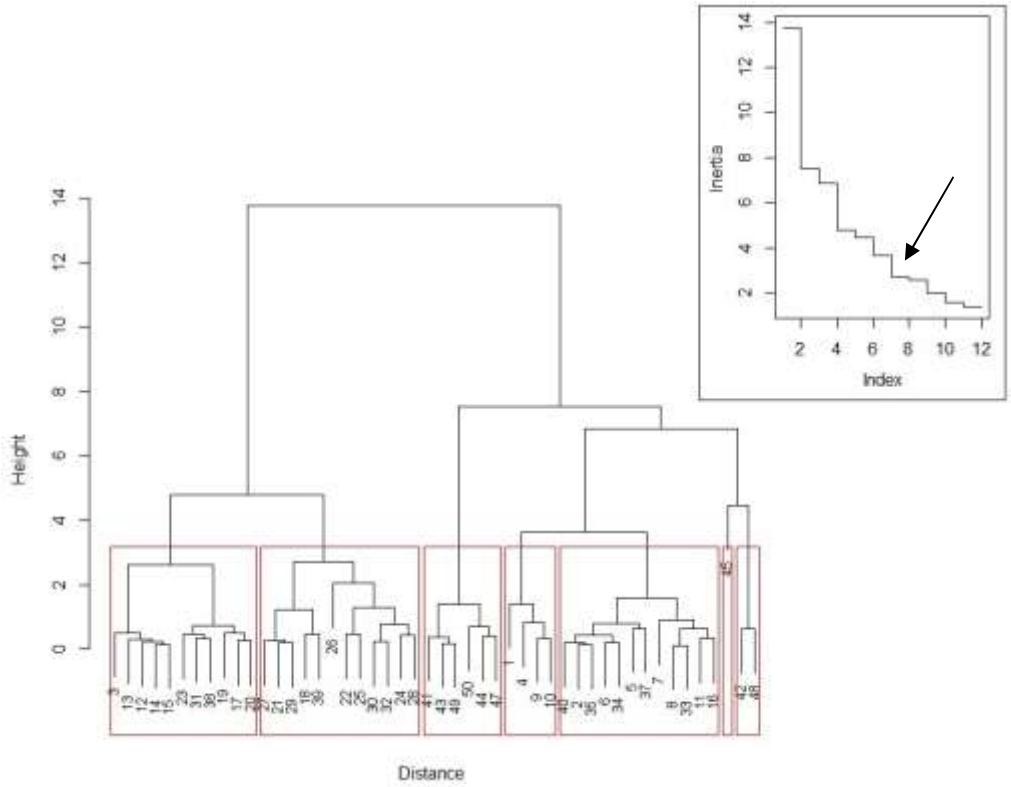
Annexe 5 : Dendrogramme obtenu par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisée à partir des coordonnées de l'ACP sur les variables ZC, M1, M2 et M3 des individus du secteur A (Garonne amont et affluents). Les 8 clusters apparaissent encadrés en rouge.

Annexe 6 : Valeurs moyennes ± SD du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des individus Salmo trutta des différents clusters aux quatre stades de vie (ZC, M1, M2 et M3) et effectifs des clusters pour le secteur B (Pique et affluents).

Cluster	ZC	M1	M2	M3	Effectif
1	0.71376 ± 0.00046	0.71456 ± 0.00069	0.71268 ± 0.00038	0.71268 ± 0.00038	4
2	0.71264 ± 0.00052	0.71249 ± 0.00033	0.71268 ± 0.00020	0.71268 ± 0.00020	12
3	0.71180 ± 0.00037	0.71144 ± 0.00046	0.71190 ± 0.00050	0.71193 ± 0.00046	11
4	0.71089 ± 0.00061	0.71073 ± 0.00067	0.71083 ± 0.00056	0.71083 ± 0.00056	12
5	0.71436 ± 0.00017	0.71483 ± 0.00054	0.71456 ± 0.00036	0.71456 ± 0.00036	6
6	0.71039 ± 0.00056	0.71445 ± 0.00015	0.71445 ± 0.00015	0.71445 ± 0.00015	2
7	0.70853	0.70849	0.71467	0.71467	1
				Total	48



Annexe 7 : Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée à partir des variables ZC, M1, M2 et M3 associées aux individus du secteur B (Pique et affluents).

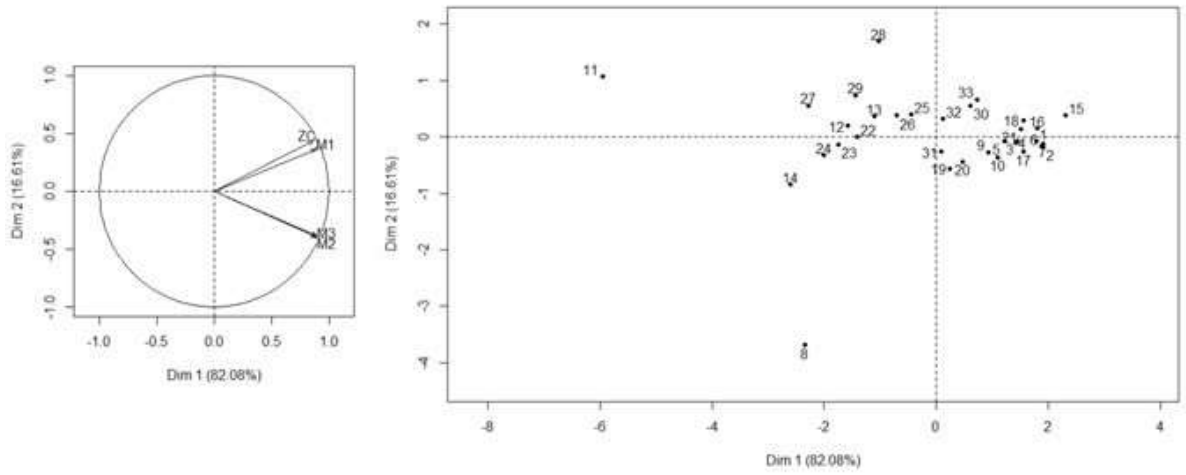


Annexe 8 : Dendrogramme obtenu par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisée à partir des coordonnées de l'ACP sur les variables ZC, M1, M2 et M3 des individus du secteur B (Pique et affluents). Les 7 clusters apparaissent encadrés en rouge.

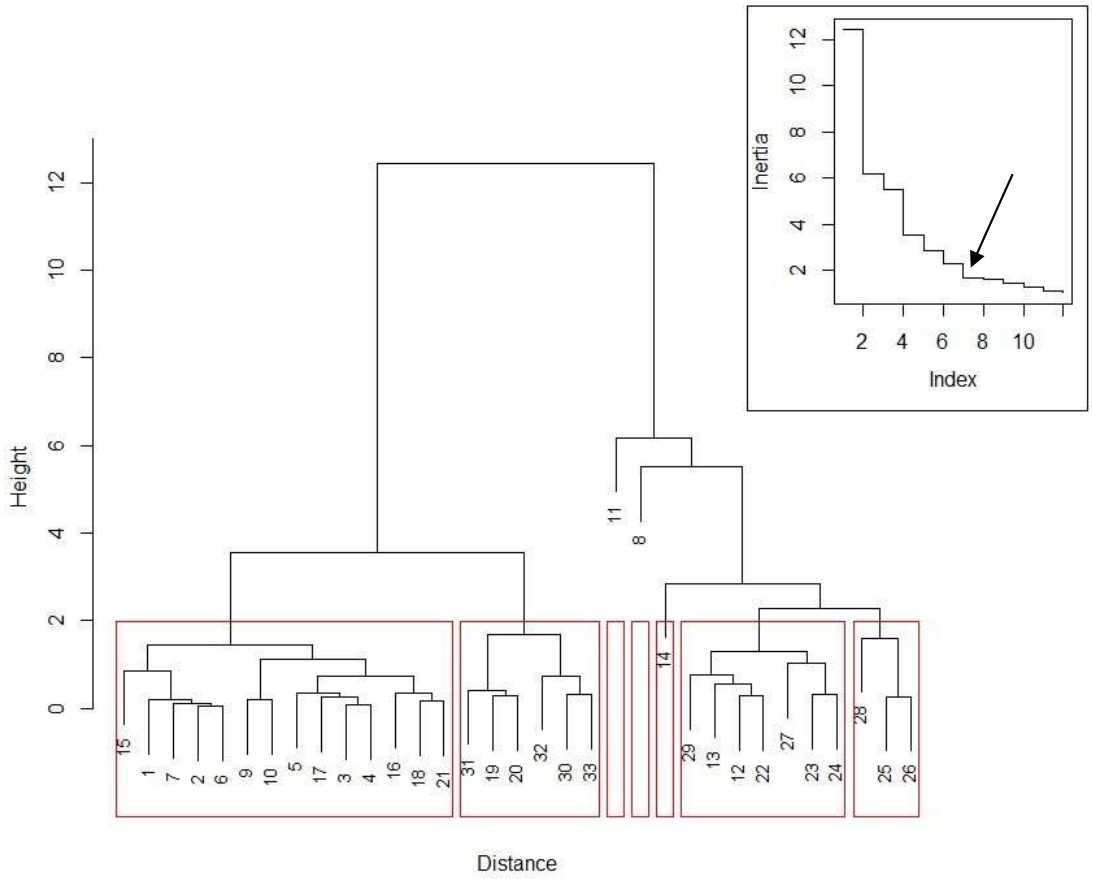
Annexe 9 : Valeurs moyennes ± SD du rapport ^{87}Sr:^{86}Sr des individus Salmo trutta des différents clusters aux quatre stades de vie (ZC, M1, M2 et M3) et effectifs des clusters pour le secteur C (Lys et ruisseaux tributaires).

Cluster	ZC	M1	M2	M3	Effectif
1	0.71795 ± 0.00052	0.71798 ± 0.00071	0.71789 ± 0.00027	0.71789 ± 0.00027	14
2	0.70910	0.70903	0.71758	0.71758	1
3	0.71054	0.71052	0.71052	0.71052	1
4	0.71473 ± 0.00084	0.71425 ± 0.00062	0.71492 ± 0.00042	0.71492 ± 0.00042	7
5	0.71029	0.71403	0.71490	0.71490	1
6	0.71681 ± 0.00092	0.71652 ± 0.00078	0.71673 ± 0.00042	0.71682 ± 0.00036	6
7	0.71663 ± 0.00072	0.71598 ± 0.00052	0.71519 ± 0.00086	0.71519 ± 0.00086	3

	Total	33



Annexe 10 : Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée à partir des variables ZC, M1, M2 et M3 associées aux individus du secteur C (Lys et ruisseaux tributaires).



Annexe 11 : Dendrogramme obtenu par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisée à partir des coordonnées de l'ACP sur les variables ZC, M1, M2 et M3 des individus du secteur C (Lys et ruisseaux tributaires). Les 7 clusters apparaissent encadrés en rouge.

Résumé

Etude de l'origine natale et de l'histoire de vie de la truite fario (Salmo trutta) du bassin de la Garonne amont par isotopie du Strontium (^{87}Sr:^{86}Sr) des otolithes

---

La partie amont du bassin de la Garonne est connue pour abriter des populations sauvages de truite fario, une espèce partiellement migratrice. Ces populations voient cependant leurs effectifs baisser dans ces systèmes relativement anthropisés et subissant des pertes de connectivité. Pour pallier à cette diminution, des truites issues d'une reproduction en pisciculture sont réintroduites dans le milieu depuis plusieurs décennies par les organisations de pêche locales.

La présente étude a cherché à décrire les parts de reproductions naturelle et artificielle dans trois secteurs hydrographiques distincts, et à apporter des informations quant aux histoires de vie des individus des rivières étudiées. Les truites collectées étaient en grande majorité nées après la crue dévastatrice de juin 2013 qui a largement impacté le secteur d'étude. Elles devaient ainsi permettre d'évaluer la résilience post-crue. L'outil utilisé pour ce travail est le rapport isotopique du strontium (^{87}Sr:^{86}Sr), qui peut varier dans les cours d'eau selon la géologie sous-jacente ou encore selon les valeurs de débits. Chez les poissons téléostéens comme la truite, ce paramètre chimique est incorporé dans les otolithes, une structure calcaire de l'oreille interne.

En comparant le ^{87}Sr:^{86}Sr des otolithes de truites élevées à la pisciculture de Soueich et de truites capturées dans les bassins de la Garonne, de la Pique et du Lys, il a été possible de discriminer les truites selon leur origine sauvage ou pisciculture. Il a été aussi possible d'apporter des précisions quant au cours d'eau de naissance des individus, et d'identifier d'éventuels déplacements entre des entités isotopiques distinctes.

Les résultats obtenus ont montré la part importante de truites issues de reproduction artificielle (<70%) dans la Garonne aval confirmant la faible fonctionnalité de ce secteur vis-à-vis de la reproduction naturelle. A l'inverse, la Garonne amont et la Pique, largement impacté par la crue de 2013, présentaient une très large majorité de truites issues de la reproduction naturelle (>95%) malgré un important effort d'alevinage également de ces deux secteurs depuis la crue.

Les individus ayant changé de milieu isotopique au cours de leur vie étaient minoritaires dans la Garonne, mais pas dans la Pique. L'étude étant placée dans un contexte de résilience des populations de truite fario après une crue centennale, l'analyse de ces déplacements souligne l'importance écologique des petits cours d'eau tributaires, ainsi que de la connectivité entre milieux. Ce travail montre enfin qu'il est possible d'utiliser l'outil isotopique ^{87}Sr:^{86}Sr à l'échelle de petits bassins, à condition de réaliser un échantillonnage conséquent, et que ce paramètre peut être informatif et utile dans l'aide à la décision pour des pratiques de gestion telles que la réintroduction de poissons.