



HAL
open science

Géochimie des Otolithes comme outil de Détermination de l'Origine Natale (affluents de naissance) de la Truite des grands Lacs Alpains, Léman, Annecy, Bourget, Sautet (projet GODONTLA)

Alexandre Richard, Gilles Bareille, Arnaud Caudron, Marc-Antoine Colleu,
Jean Marcel Dorioz, Matthias Vignon

► To cite this version:

Alexandre Richard, Gilles Bareille, Arnaud Caudron, Marc-Antoine Colleu, Jean Marcel Dorioz, et al.. Géochimie des Otolithes comme outil de Détermination de l'Origine Natale (affluents de naissance) de la Truite des grands Lacs Alpains, Léman, Annecy, Bourget, Sautet (projet GODONTLA). [Rapport de recherche] IPREM - Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux. 2019. hal-03141171

HAL Id: hal-03141171

<https://univ-pau.hal.science/hal-03141171>

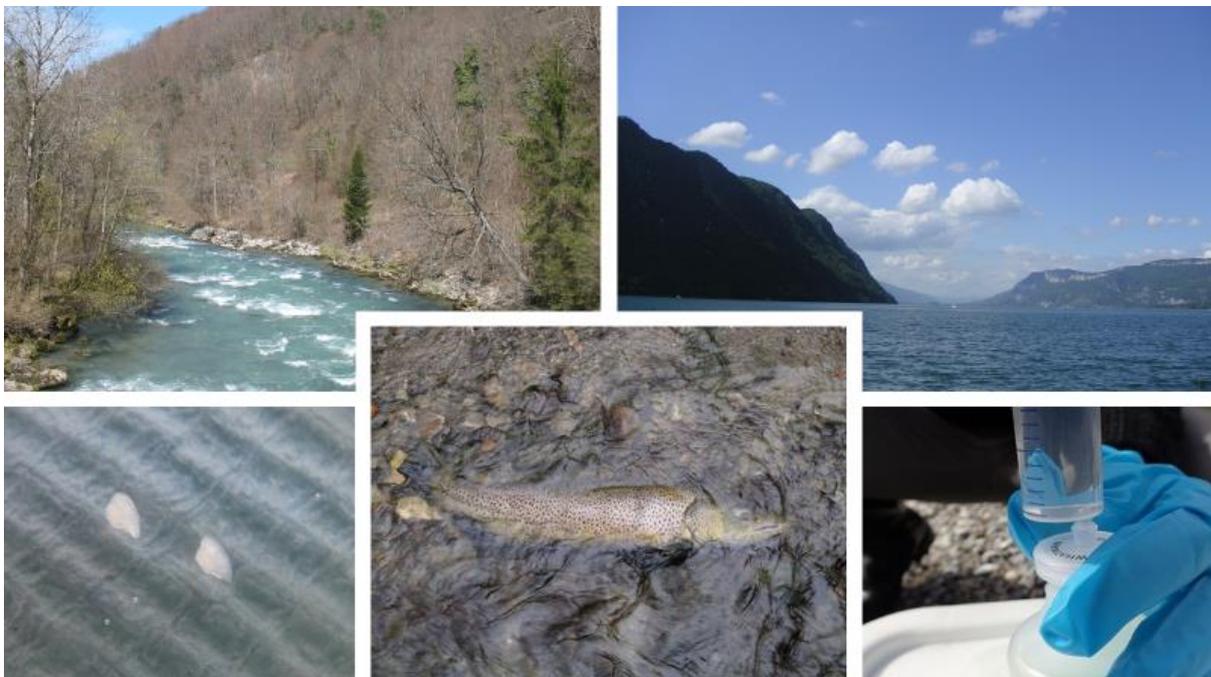
Submitted on 15 Feb 2021

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.

Géochimie des Otolithes comme outil de Détermination de l'Origine Natale (affluents de naissance) de la Truite des grands Lacs Alpains, Léman, Annecy, Bourget, Sautet (projet GODONTLA)

Rapport final



Septembre 2019

Remerciements

Nous remercions les financeurs de ce projet : l'Agence Française pour la biodiversité (AFB), l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), la Direction Générale de l'Environnement (DGE) du canton de Vaud et la Direction Générale de l'Eau (DGEAU) du canton de Genève. Merci à Messieurs Frédéric Hofmann (DGE), Dimitri Jaquet (DGEAU) et Daniel Hefti (OFEV) qui ont soutenu ce projet dès le départ. Merci aux personnes qui ont participé aux échantillonnages ou apporté leur expertise dans le choix des stations, en particulier les gardes-pêche des cantons de Vaud, Genève et du Valais. Merci à la station INRA UMR CARTEL pour la mise à disposition de la collection d'otolithes de truites lacustres. Merci également aux étudiants qui ont aidé au travail fastidieux d'extraction et de préparation des otolithes et des écailles et à Laure Vigier pour son appui SIG.

Nous remercions enfin M. Yvon Crettenand (Service Chasse, Pêche et Faune du canton du Valais), l'AAPPMA du Chablais Genevois, la Fédération des AAPPMA de Haute-Savoie, ainsi que toutes les personnes bénévoles qui nous ont permis de prélever les échantillons nécessaires à nos analyses.

Nous remercions aussi M. Labedan recruté en CDD dans le cadre du projet, ainsi que les ingénieurs du LCABIE, C. Pécheyran, S. Berail, H. Tabouret et A. Holub pour leur assistance dans la préparation, l'analyse et le traitement des données microchimiques. Merci aussi à O. Gilbert pour son implication dans la gestion administrative du projet au sein de l'IPREM.

Auteurs :

Alexandre RICHARD¹

Gilles BAREILLE²

Arnaud CAUDRON¹

Marc-Antoine COLLEU¹

Jean-Marcel DORIOZ³

Matthias VIGNON⁴

1. SCIMABIO Interface, 5 rue des quatre vents, les cyclades B, 74200 Thonon-les-Bains

2. UMR IPREM CNRS/UPPA, 2 avenue du Président Angot, 64053 Pau

3. UMR CARTEIL INRA/UDS, 75 Avenue de Corzent, 74200 Thonon-les-Bains

4. UMR ECOBIOP INRA/UPPA, Quartier Ibarron, 64310 Saint Pée sur Nivelle

Contact : info@scimabio-interface.fr, gilles.bareille@univ-pau.fr

Citation :

Richard A, Bareille G., Caudron A., Colleu M.A., Dorioz J.M., Vignon M., 2018. Recherche de l'origine natale des truites du Léman à partir de la composition géochimique des otolithes. Rapport final. 49p.

Résumé

La truite lacustre est un écotype de l'espèce *Salmo trutta* qui vit en lac et se reproduit en rivière. Les populations de truites lacustres des grands lacs alpins sont considérées comme menacées en raison de la dégradation de leurs habitats de frai et de la fragmentation des affluents entravant l'accès aux frayères. Pour le gestionnaire, il est important de connaître quels sont les affluents frayères les plus productifs, qui doivent être préservés car ils contribuent le plus au recrutement naturel, et ceux qui contribuent de manière marginale au stock en place et pour lesquels des plans de restauration peuvent être envisagés.

La microchimie des otolithes est un outil en plein essor depuis une dizaine d'années, qui est basée sur l'analyse d'éléments trace piégés dans les otolithes et dont les concentrations de certains d'entre eux varient en proportion avec le milieu de vie. La première étape du projet GODONTLA a étudié la faisabilité d'une discrimination de l'origine natale des truites, en travaillant sur les caractéristiques de l'eau et des otolithes de juvéniles de truites prélevés en 2015 et 2016 dans les principaux affluents de 4 grands lacs alpins : Léman, Annecy, Bourget et Sautet. Après avoir discriminé des groupes d'affluents aux caractéristiques géochimiques communes, la deuxième étape a consisté à analyser des otolithes de truites lacustres adultes du Léman pour les assigner à une origine natale en utilisant une approche statistique originale appelée 'random forest'.

Les résultats de la première étape montrent une hétérogénéité spatiale mais aussi temporelle dans les ratios élémentaires (Ba:Ca, Sr:Ca, Sr:Ba, Mg:Ca, Mn:Ca) et isotopique ($^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr) des eaux et des otolithes de truites des différents affluents étudiés. **Sur le Léman**, parmi les 13 affluents principaux, 6 groupes (avec une erreur d'assignation de 5%) ou 8 groupes (erreur moyenne d'assignation = 10%) ont été constitués. **Sur le lac d'Annecy**, les 8 affluents principaux peuvent être séparés en 6 groupes (erreur moyenne d'assignation = 10%). **Sur les lacs du Bourget et du Sautet**, une excellente discrimination a pu être établie entre les deux affluents frayère (erreur moyenne d'assignation de 1% sur le Bourget et 0% sur le Sautet).

Pour la deuxième étape, les tests d'assignation de l'origine natale de 165 truites lacustres pêchées dans le Léman montrent une origine unique à l'un des 6 groupes de rivières pour 78% des individus analysés, ou pour 73% des individus pour une assignation plus précise à 8 groupes, permettant de différencier les deux affluents principaux (Rhône et Dranse). Bien que tous les affluents ne puissent pas être différenciés, les résultats indiquent une importante contribution des petits affluents frayères, en particulier d'un groupe constitué du Boiron de Morge, de la Morge et du Boiron de Nyon (contribution voisine de 25%), mais aussi du Redon et du Pamphiot. En outre, la zone de capture des individus analysés ne semble pas correspondre à la zone de confluence de l'affluent d'origine, ce qui traduirait une possible mobilité des truites au sein du lac.

Ces résultats confirment l'intérêt de la microchimie des otolithes pour la discrimination de l'affluent d'origine des truites lacustres, ceci dans les quatre lacs étudiés. Les perspectives en termes de gestion sont intéressantes puisque les principaux bassins versants sont discriminés avec un taux d'erreur acceptable, et une certaine cohérence géographique demeure dans les regroupements de cours d'eau ayant des caractéristiques géochimiques proches.

Table des matières

1	Préambule	5
1.1	Contexte et problématique de la gestion de la truite lacustre sur le Léman.....	5
1.2	Principe méthodologique de l'isotopie et de l'analyse d'éléments traces des otolithes	6
1.3	Le bassin lémanique : un contexte géologique favorable pour une discrimination des affluents par microchimie des otolithes ?.....	7
1.4	Rappel des principaux résultats de l'étude de faisabilité Léman (Caudron <i>et al.</i> , 2015)	9
1.5	Objectifs de l'étude 2016-2019	10
2	Matériels et méthode	11
2.1	Etapes de travail pour rechercher des signatures géochimiques discriminantes.....	11
2.2	Présentation des sites d'étude	11
2.3	Collecte et préparation des échantillons d'eau.....	15
2.4	Prélèvement des truites et effectifs analysés	16
2.5	Préparation des otolithes	18
2.6	Analyse élémentaire et isotopique du strontium.....	19
2.6.1	Analyse des eaux	19
2.6.2	Analyse des otolithes	19
2.7	Analyses statistiques	21
3	Résultats	23
3.1	Composition géochimique des eaux des affluents du Léman.....	23
3.2	Composition géochimique des eaux des affluents des lacs d'Annecy, du Bourget et du Sautet.	25
3.3	Assignation des juvéniles.....	27
3.3.1	Sélection des paramètres discriminants	27
3.3.2	Résultats de l'analyse discriminante avec Random Forest pour le Léman	27
3.3.3	Résultats de l'analyse discriminante avec Random Forest pour les lacs d'Annecy, Bourget et Sautet.	34
3.4	Assignation des adultes du Léman	37
4	Discussion	43
5	Références	47

1. Préambule

1.1 - Contexte et problématique de la gestion de la truite lacustre sur le Léman

Le Léman fait partie de l'aire naturelle de répartition de la truite commune (*Salmo trutta*). Ce bassin abrite la forme lacustre de l'espèce qui développe un cycle de vie particulier avec une reproduction et une phase de vie des juvéniles en rivière et une phase de grossissement en lac (Champigneulle et al. 1999). Le recrutement naturel est entièrement issu de la reproduction dans les tributaires, la reproduction directement en lac en zone littorale n'a pas été observée.

En France, l'espèce est considérée comme menacée au niveau de l'abondance et de la variabilité génétique (Keith et al. 2011) et son habitat de reproduction est également protégé au titre de l'arrêté ministériel du 08/12/88. Sur l'ensemble du territoire suisse, la truite lacustre est considérée comme fortement menacée d'extinction, avec comme causes principales la fragmentation des rivières limitant l'accès aux zones de reproduction, la dégradation de la qualité des habitats à juvéniles et l'artificialisation des régimes hydrologiques.

Outre sa valeur patrimoniale, la truite lacustre sur le Léman présente également un enjeu socio-économique majeur en raison de son exploitation par la pêche amateur et professionnelle. Cet enjeu devient de plus en plus important en raison d'une évolution à la baisse des captures de truites au cours des dernières décennies. Depuis le début des années 1990, les quantités de captures de truites sur le Léman sont en constante diminution et ont été divisées par 2,5 en 20 ans (Fig. 1.1) et ce malgré des efforts de repeuplements constants. La chute des effectifs de truite lacustre a également été observée dans d'autres lacs alpins comme le Bourget, Annecy et le Sautet.

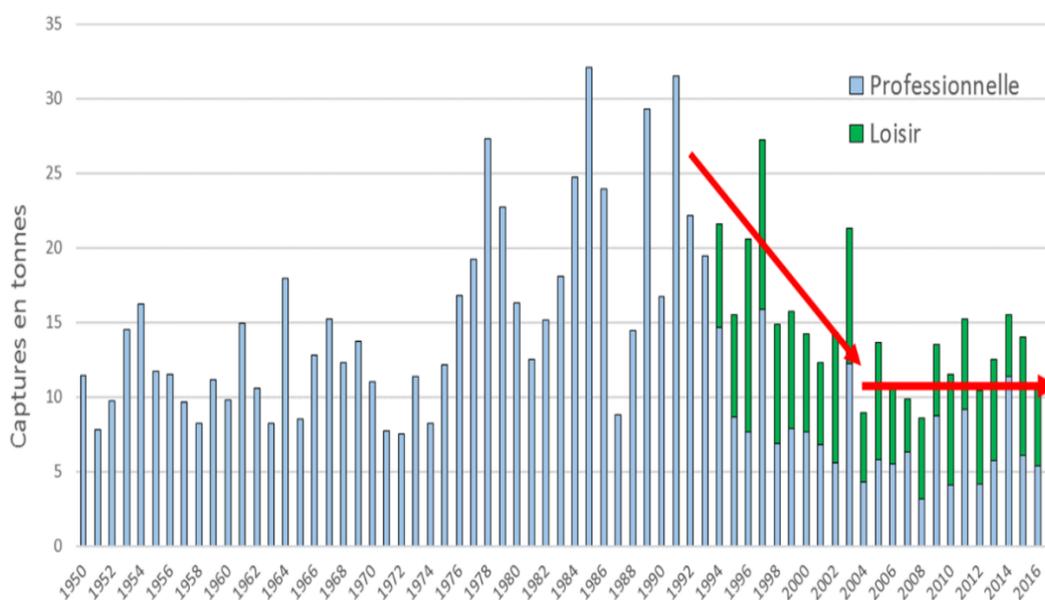


Figure 1.1 : Evolution des captures de truites dans le Léman (Source : commission consultative pour la Pêche dans le Léman)

Afin de mieux cerner les origines de cette baisse, des premières investigations ont été récemment menées (2008-2013) pour évaluer les contributions respectives du recrutement naturel et des repeuplements dans les captures des pêcheurs. La technique de fluoromarquage des otolithes à l'Alizarine Red S (Caudron et Champigneulle 2006, 2009) a été mise en œuvre pour marquer l'intégralité des individus repeuplés (952 000 individus) de la cohorte 2008. Cette étape a permis d'évaluer si une baisse de la contribution des repeuplements pouvait contribuer à la baisse des captures.

Les résultats obtenus indiquent que les captures des pêcheurs et les populations de truite lacustre sont très majoritairement soutenues par le recrutement naturel. En effet, sur le Léman, les contributions du repeuplement sont évaluées à 24% pour la pêche amateur, 15% pour la pêche professionnelle et 22% pour les jeunes géniteurs migrants (Champigneulle et Caudron 2013). Dans ce contexte de baisse des captures et de populations majoritairement soutenues par le recrutement naturel issu des affluents, il semble aujourd'hui primordial de **mener des investigations supplémentaires sur les différentes origines possibles de cette composante naturelle.**

1.2 - Principe méthodologique de l'isotopie et de l'analyse d'éléments traces des otolithes

La détermination de l'origine natale (affluents spécifiques, piscicultures) de salmonidés et/ou de déplacements entre affluents est possible aujourd'hui grâce à l'analyse d'éléments traces et/ou de rapports isotopiques contenus dans une des pièces calcifiées (otolithe sagittae) constitutive de l'oreille interne du poisson (géochimie des otolithes). Cette pièce est formée par le dépôt journalier de couches de carbonate de calcium/protéines tout au long de la vie du poisson. Des éléments chimiques tels que le strontium (Sr), le calcium (Ca) ou le baryum (Ba) sont incorporés chaque jour de la vie du poisson dans ces couches journalières et les ratios de certains de ces éléments (Sr:Ca, Ba:Ca, $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$) varient en proportion avec le milieu de vie (Elsdon and Gillanders, 2004). Ces rapports élémentaires et isotopiques sont donc susceptibles de renseigner sur les milieux occupés par le poisson à différents stades de son développement (rivières spécifiques ou bassin de développement, piscicultures) sous réserve de l'existence de compositions géochimiques contrastées entre les différents milieux fréquentés (rivières, piscicultures).

En France, cette approche a été récemment testée sur le saumon du bassin de l'Adour (Martin, 2013; Martin et al., 2013a, b) où elle a permis de déterminer pour des saumons adultes revenus se reproduire, l'origine natale (rivière de développement au stade juvénile) mais aussi leur origine anadrome ou d'élevage (pisciculture de Cauterets dans les Hautes Pyrénées). La géochimie des otolithes a été également utilisée avec succès sur d'autres continents, Etats Unis, Canada, Japon, pour identifier l'origine natale de plusieurs espèces de saumons (Kennedy et al., 2005 ; Barnett-Johnson et al., 2008 ; Zimmerman et al., 2013), examiner des mouvements entre affluents ou entre affluents et lacs (Wells et al., 2003 ; Whitley et al., 2009 ; Amano et al., 2013) ou préciser l'apparition de truites issues d'alevinage dans le lac Michigan (Munro et al., 2005).

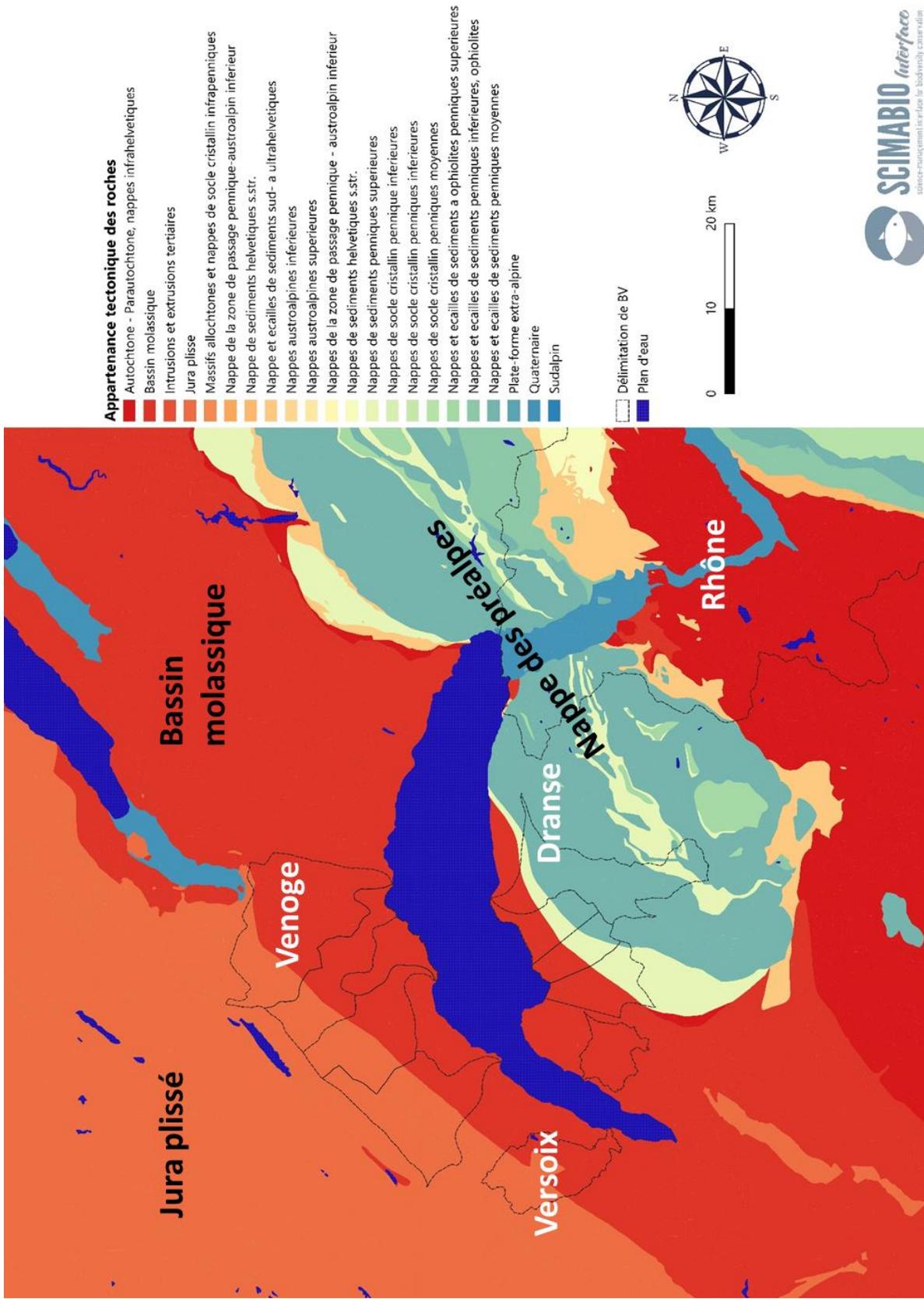
Cette méthodologie présente donc un fort potentiel pour les salmonidés comme la truite fario. Son application est cependant conditionnée par l'existence de contrastes dans la composition géochimique des eaux entre les différents environnements occupés par cette espèce. L'isotopie du strontium ($^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$) est un des indicateurs parmi les plus intéressants car 1) il peut présenter des variations assez marquées d'un bassin-versant à un autre, ceci en relation étroite avec la diversité géologique et l'âge

des roches des bassins-versants et 2) il n'existe pas de fractionnement biologique entre les eaux et les otolithes pour ce rapport, ce qui se traduit par un enregistrement direct du rapport d'une rivière à l'otolithe. Néanmoins, bien souvent un couplage isotopie du Sr ($^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$) et rapports élémentaires (Sr:Ca ; Ba:Ca) permet une discrimination plus poussée des différents milieux de vie.

1.3 - Le bassin lémanique : un contexte géologique favorable pour une discrimination des affluents par microchimie des otolithes ?

Le contexte géologique du bassin versant peut fournir certaines indications sur la possibilité de discriminer des groupes d'affluents à partir de certains éléments chimiques, dont la concentration dépend notamment de la nature de la roche. Le bassin lémanique est situé à l'interface entre la chaîne du Jura et les Préalpes (Fig. 1.2). Il est principalement constitué d'un bassin molassique tertiaire déposé dans les Préalpes, au-dessus de formations du Crétacé inférieur. Le bassin molassique est constitué principalement de grès, mais aussi de poudingue, silt et marne (Charollais et al., 2007). Le Jura plissé est davantage constitué de calcaire, de marne, d'argile et gypse. Enfin les Préalpes sont constituées d'alternances de marne et de calcaire. Cette diversité géologique ne permet que d'émettre des hypothèses *a priori* quant à d'éventuels contrastes chimiques entre affluents du Léman ; des analyses de la chimie de l'eau sont indispensables pour le confirmer.

Figure 1.2 : Appartenance tectonique des roches du bassin lémanique



1.4 - Rappel des principaux résultats de l'étude de faisabilité Léman (Caudron *et al.*, 2015)

L'étude de faisabilité avait pour objectif de chercher à discriminer l'origine natale des truites du bassin lémanique grâce à leurs signatures géochimiques. Des prélèvements d'eau et d'otolithes avaient été réalisés en 2015 au niveau de 19 cours d'eau et de 4 piscicultures du bassin lémanique (Fig. 1.3).

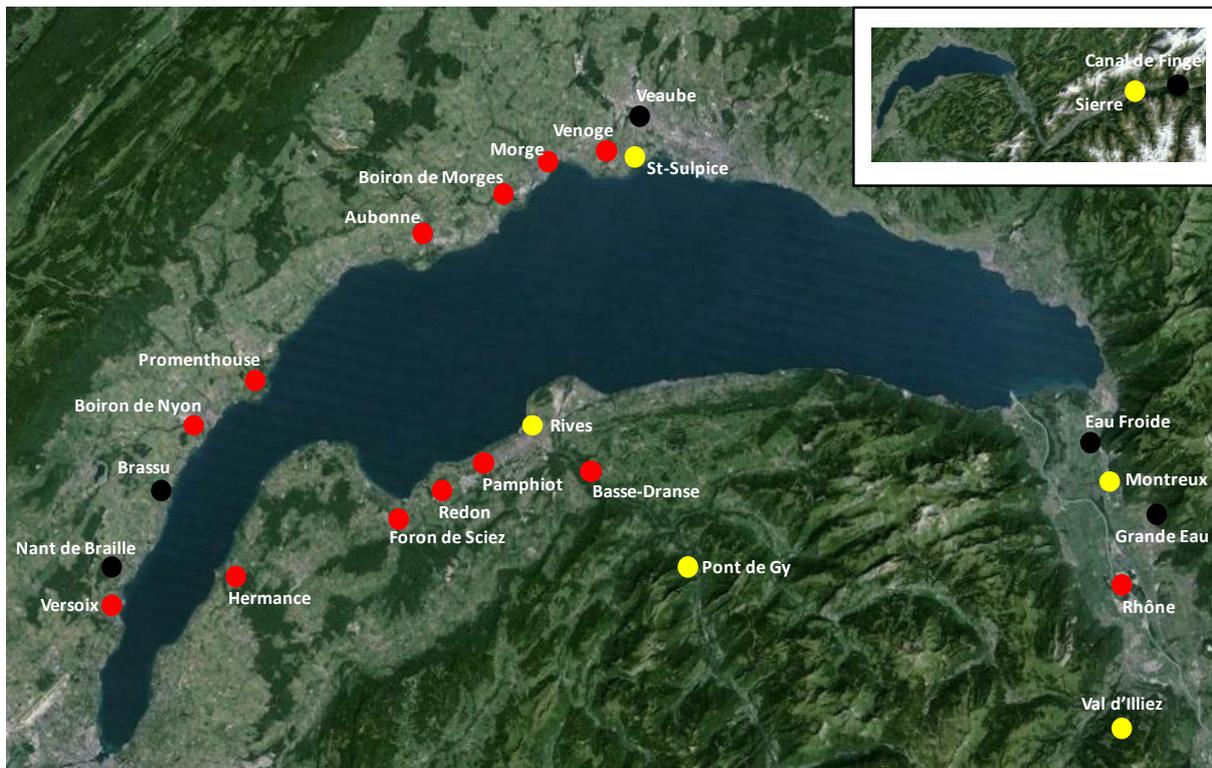


Figure 1.3 : localisation des sites étudiés sur le bassin du Léman, (en jaune : les piscicultures, en rouge : les 13 cours d'eau présentant un intérêt majeur comme zone de reproduction).

En résumé, les résultats obtenus à partir de l'analyse de truites juvéniles d'une seule cohorte étaient les suivants:

1. **La possibilité de discriminer les individus naturels et de piscicultures avec un taux d'erreur de 2,3%.**
2. **Les tests exploratoires de discrimination des différentes piscicultures entre elles ont montré des résultats intéressants** qui demanderaient à être confortés par l'analyse d'un plus grand nombre d'individus.
3. Une discrimination des principaux groupes d'affluent-frayères a été réalisée avec des risques d'erreur acceptable. **Les 13 rivières principales se sont discriminées en 6 groupes avec une erreur de reclassement de l'ordre de 4.8%, ou en 11 groupes avec un taux d'erreur de reclassement de 10%.**

4. La possibilité d'utiliser la collection d'otolithes de poissons adultes en stock et déjà montés sur lame a été validée.

1.5 - Objectifs de l'étude 2016-2019

Cette seconde phase de l'étude a 4 principaux objectifs :

1. Evaluer la variabilité temporelle de la signature chimique de l'eau des 13 affluents principaux du Léman ;
2. Discriminer les principaux groupes d'affluents frères du Léman, sur la base de la microchimie des otolithes de truites juvéniles prélevées en 2015 et 2016, et évaluer l'incidence de la variabilité temporelle des signatures microchimiques sur les résultats ;
3. Rechercher l'origine natale (groupe d'affluents) des truites adultes de la cohorte 2008 capturées au Léman, et évaluer les contributions des différents groupes d'affluents à la reproduction naturelle de la truite, en tenant compte de l'incertitude sur les assignations individuelles.
4. Evaluer le potentiel de la microchimie des otolithes pour assigner une origine natale aux truites lacustres de trois autres lacs alpins (Annecy, Bourget, Sautet) sur la base d'analyses chimiques d'eaux et d'analyses microchimiques des otolithes de truites juvéniles prélevées en 2016.

2. Matériels et méthode

2.1 - Etapes de travail pour rechercher des signatures géochimiques discriminantes

Au niveau de chaque affluent étudié pour les 4 lacs (Léman, Annecy, Bourget, Sautet), des prélèvements d'eaux et de juvéniles de truite commune ont été réalisés. Le prélèvement d'eau à un instant t ne pouvant rendre compte des variations intra-annuelles (crues, étiage, fonte des neiges...), les otolithes ont permis d'étudier une fenêtre temporelle plus grande (durée totale de vie en affluent). Ce double prélèvement a également permis de vérifier la concordance entre la composition chimique du milieu et celle de l'otolithe. Ces prélèvements ont été réalisés au printemps 2015 (Léman uniquement) et à l'automne 2016 (Léman, Annecy, Bourget, Sautet). Des prélèvements d'eau complémentaires ont été effectués en été 2016 sur le Léman pour évaluer la variabilité saisonnière (soit 3 campagnes de prélèvements d'eau).

Les signatures géochimiques des sites d'étude ont été étudiées en plusieurs étapes :

1. Déterminer la composition en éléments (Ba, Mn, Zn, Ca, Sr, Mg) et la signature isotopique du Sr ($^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$) des eaux pour rechercher d'éventuelles différences ;
2. Examiner la variabilité du rapport $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$ et de la composition élémentaire (Sr:Ca, Ba:Ca ; Sr:Ba ; Mn:Ca ; Mg:Ca) dans les otolithes de quelques truitelles par affluent afin de vérifier l'adéquation entre signature eau/signature otolithe ;
3. Caractériser la stabilité du signal microchimique au cours du cycle hydrologique annuel et interannuel ;
4. Rechercher des couplages d'éléments pour permettre une discrimination des différents milieux de vie.

2.2 - Présentation des sites d'étude

Le Léman :

L'étude s'est focalisée sur 13 cours d'eau, 4 situés sur la rive française et 11 sur la rive Suisse (Fig 2.1 et en gras dans le tableau 1). Les autres cours d'eau ont été seulement étudiés au cours de l'étude de faisabilité 2015 et n'ont pas fait l'objet de prélèvements complémentaires en 2016.

Tableau 1.1 : Liste des 19 cours d'eau étudiés sur la rive suisse et française du Léman. En gras : les 13 cours d'eau présentant un intérêt particulier pour la reproduction naturelle des géniteurs de truite de lac.

Cours d'eau sur Suisse			Cours d'eau sur France
Canton de Genève	Canton de Vaud	Canton du Valais	
Hermance	Boiron de Nyon	Rhône	Basse-Dranse
Versoix	Promenthouse	Canal de Finges	Pamphiot
Nant de Braille	Aubonne		Redon
Brassu	Boiron de Morge		Foron de Sciez
	Morges		
	Venoge		
	Veube (affl. de Venoge)		
	Eau froide de Roche		
	Grande Eau		

Sur chaque affluent, seule la portion accessible aux géniteurs de truites lacustres a été étudiée, afin de cibler les zones de recrutement naturel.

Annecy, Bourget, et Sautet :

L'étude s'est focalisée sur les huit affluents principaux du lac d'Annecy (Bluffy, Angon, Eau morte, Ire, Bornette, Entrevernes, Laudon, Planche ; Fig. 2.1), les 2 affluents du lac du Bourget (Leyse et le Sierroz ; Fig. 2.2) et enfin les deux affluents du lac du Sautet (Souloise et Drac ; Fig. 2.3).

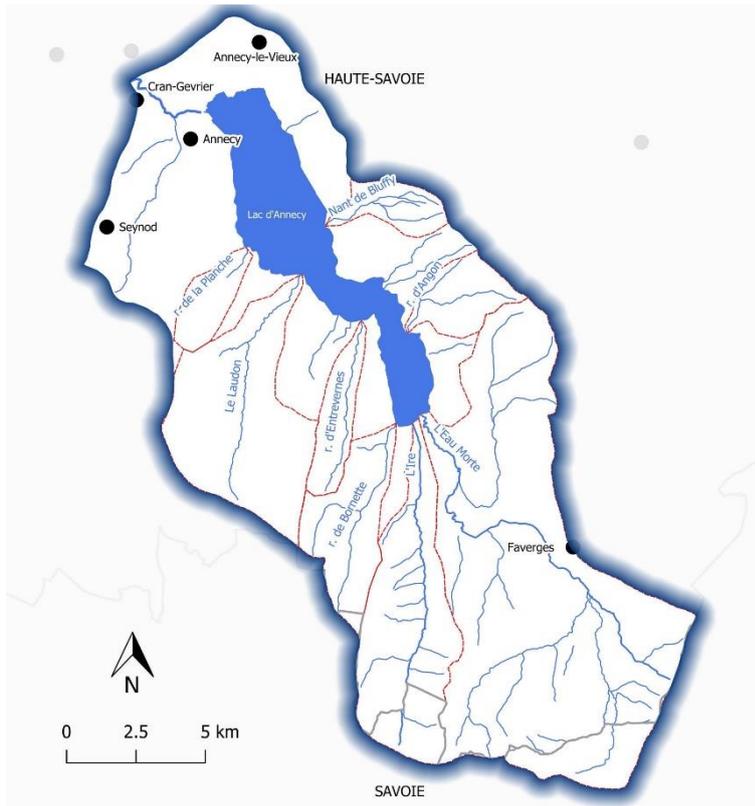


Figure 2.1 : localisation des huit affluents étudiés sur le bassin du lac d'Annecy



Figure 2.2: localisation des deux affluents étudiés sur le bassin du lac du Bourget.

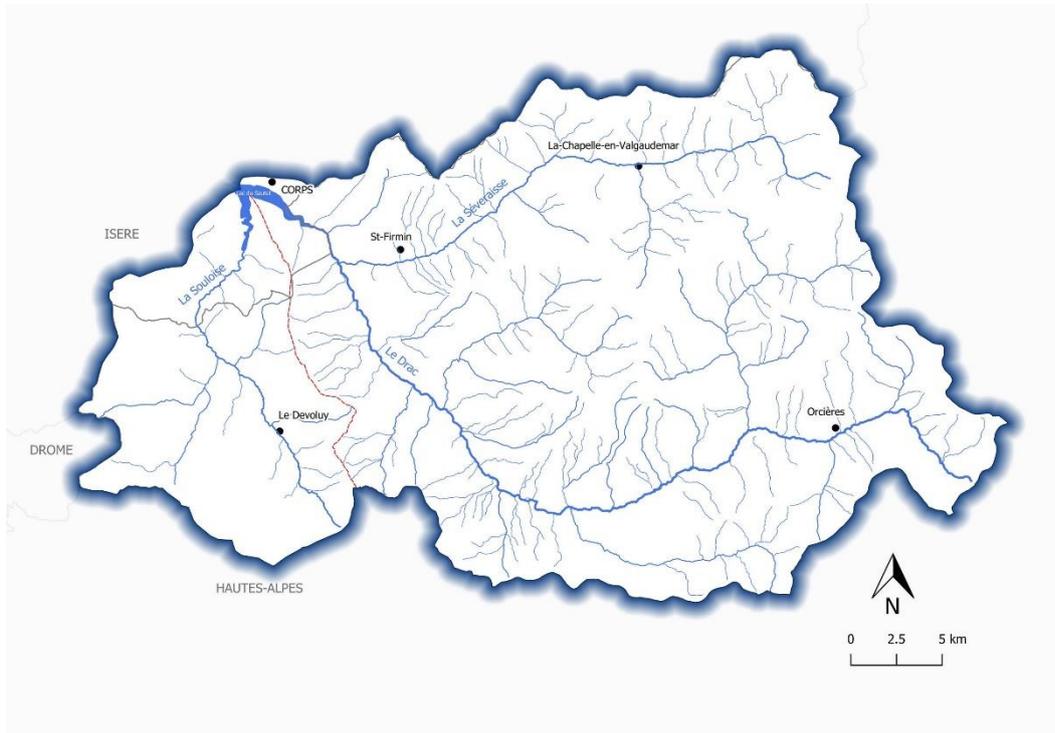


Figure 2.3: localisation des deux affluents étudiés sur le bassin du lac du Sautet

2.3 - Collecte et préparation des échantillons d'eau

Les prélèvements d'eau ont été réalisés au printemps 2015 (10 et 11 mars), en été 2016 (28/07/2016) ainsi qu'à l'automne 2016 (28-30/09/2016) sur les 13 cours d'eau du Léman dans des conditions hydrologiques normales (hors période de crue et de lessivage) et similaires sur tous les cours d'eau. Les prélèvements d'eau ont été réalisés sur une seule station ; en raison de son importance le Rhône a fait l'objet de 2 échantillonnages d'eau. Sur les trois autres lacs, les prélèvements ont également été réalisés sur une seule station par affluents en fin de printemps 2017 sur Annecy et le Bourget et en 2015 sur le Sautet.

Les échantillons ont été collectés en respectant le protocole suivant (Fig. 2.4) :

1. Lavage préalable de l'ensemble du matériel utilisé avec de l'acide nitrique à 10%, afin d'éviter une éventuelle contamination des échantillons ;
2. Prélèvement de 125 mL d'eau à l'aide d'un flacon préalablement rincé 2 fois avec de l'eau filtrée du site de prélèvement ;
3. Filtration de l'eau grâce à un filtre PVDF Whatmann fixé sur une seringue en polypropylène ;
4. Acidification de l'échantillon avec 2mL d'acide nitrique (J.T. Baker, Ultrex) ;
5. Stockage des échantillons d'eau au frais et à l'abri de la lumière jusqu'aux analyses.



Figure 2.4 : étapes du protocole de prélèvement d'eau.

Quatre paramètres physico-chimiques ont été mesurés *in situ* grâce à une sonde multi-paramètres (modèle HQ30D, Hach-Lange): conductivité, pH, température, oxygène dissous. Les mesures ont été effectuées en 1, 2 ou 3 points, en fonction de l'étendue de la zone accessible aux truites lacustres et ont été réalisées le même jour que le prélèvement. La conductivité est un paramètre particulièrement informatif, car hautement liée à la composition en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) de l'eau, et donc à l'origine géologique.

2.4 - Prélèvement des truites et effectifs analysés

Bassin du Léman :

Les prélèvements de juvéniles ont été répartis sur 2 à 3 stations par affluent, situées sur la partie basse des rivières, accessible par les truites lacustres (voir détail des stations en annexe 1). Lors de chaque prélèvement de juvéniles, de 5 à 10 poissons ont été échantillonnés par pêche électrique sur chaque affluent en recherchant les juvéniles (1+/2+ en mars 2015 ; 0+/1+ en septembre 2016). L'âge a été estimé *a posteriori* par scalimétrie, selon la méthode décrite par Ombredane & Baglinière (1992). Les prélèvements réalisés dans différentes piscicultures en 2015 n'ont pas été reconduits (voir rapport Caudron et al., 2015). Les poissons prélevés ont été anesthésiés puis euthanasiés par surdose d'anesthésiant (eugénol à 10%). En 2015, 61 juvéniles de truites ont été analysés sur les 13 affluents principaux ; l'effort d'échantillonnage a été intensifié en 2016 puisque 108 juvéniles ont pu être analysés sur ces mêmes rivières (Annexe 1).

La recherche de l'origine natale a été menée sur les truites de la cohorte 2008, prélevées surtout par les pêcheurs amateurs dans le Léman entre 2009 et 2012, au cours de l'étude visant à évaluer la contribution de l'alevinage dans les captures (Champigneulle et Caudron 2013). Un échantillon de 165 otolithes a été sélectionné aléatoirement parmi les individus considérés comme issus de recrutement naturel (non marqués à l'alizarine), en prenant garde d'avoir un échantillon représentatif des différentes zones du lac (Fig. 2.5). La majorité des échantillons provient des zones 2, 3 et 4 qui regroupent les confluences de 10 des 13 affluents étudiés (tous excepté la Versoix, le Boiron de Nyon et l'Hermance, qui se situent dans la zone 1). Sachant que l'essentiel des captures de truites a été réalisé dans le grand lac et en proportions relativement similaires entre les zones 2, 3 et 4, l'échantillonnage proposé est jugé suffisamment représentatif des captures à l'échelle du lac ; il n'apparaît pas de sur-échantillonnage de certaines zones. La zone 5, moins pêchée par les pêcheurs amateurs, ne présente pas de confluence notable, à la différence des autres zones.

En complément, des truites capturées en affluent au moment de la reproduction naturelle (27 individus) ou par les pêcheurs amateurs (14 individus) ont été également analysées. Enfin, 6 truites capturées dans le Léman et marquées à l'alizarine ont également été analysées lors de l'étude de faisabilité. Le présent rapport ne présentera toutefois que les analyses des 165 individus capturés dans le Léman.

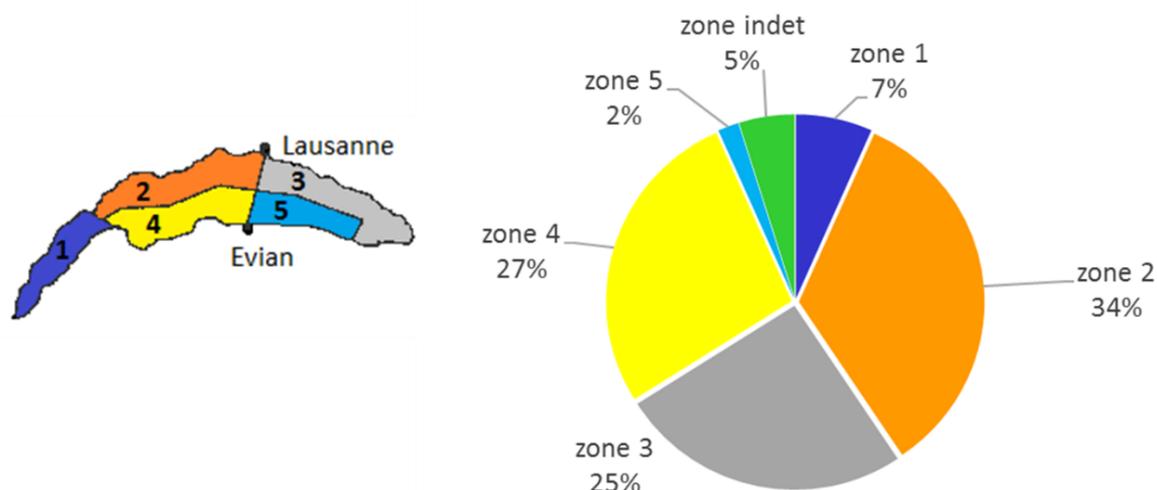


Figure 2.5 : Répartition des 165 truites analysées en fonction de la zone de capture dans le Léman

Les tailles des 165 truites analysées (Fig. 2.6) s'échelonnaient entre 170 et 800 mm (moyenne = 452 ± 137 mm). La majorité des truites étaient dans leur quatrième année de vie (âge 3+ pour 61% des individus), 14% des individus étaient des 1+ et 25% étaient des 2+.

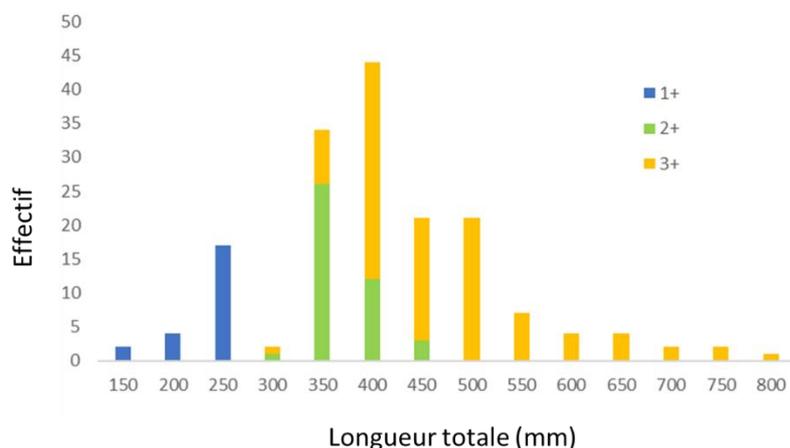


Figure 2.6 : Distribution des 165 truites analysées et provenant des captures au Léman, en fonction de leur taille et de leur âge

Bassin des lacs d'Annecy, Bourget et Sautet :

Dans ces trois bassins, uniquement des juvéniles de truites ont été prélevés en automne 2016, là aussi sur la partie basse des rivières, accessible par les truites lacustres. Lors de chaque prélèvement de juvéniles, de 5 à 10 poissons ont été échantillonnés par pêche électrique sur chaque affluent. 57

juvéniles de truites ont été analysés sur le bassin du lac d'Annecy, 11 sur le bassin du lac du Bourget et 10 sur le bassin du lac du Sautet.

2.5 - Préparation des otolithes

L'extraction des otolithes (Fig. 2.7) a été réalisée selon la méthode décrite par Caudron et Champigneulle (2006). Les otolithes ont ensuite été inclus soit dans une résine Araldite 2020 (pour les prélèvements 2015) puis séchés 48h à 60°C, ou alors dans une résine Crystalbond™ 509 (AREMCO) qui présente l'avantage de passer en phase liquide au-dessus de 74°C et de durcir rapidement en refroidissant (pour les prélèvements 2016 + otolithes adultes). Cette seconde méthode d'inclusion avait déjà été employée pour la préparation des otolithes adultes de l'expérience de marquage 2008 (vérification des marques alizarine). Un test de faisabilité avait montré que les otolithes étaient exploitables, après découpe de la lame de verre (carré de 5 x 5 mm) sur laquelle la goutte de résine et l'otolithe avaient été placés.

Les otolithes inclus ont été ponçés manuellement dans le plan sagittal jusqu'au primordium à l'aide de disques de papier silice humidifiés avec de l'eau MilliQ (18,2 ΩQ). Après ponçage, un polissage fin est réalisé à l'aide de poudre d'alumine Al_2O_3 pour éliminer les principales rayures, puis ils sont séchés et stockés en tube eppendorfs. A ce stade, les otolithes vatéritiques n'ont pas été conservés pour l'analyse en raison de leur faible capacité à fixer les éléments chimiques en relation avec le milieu ambiant, et de l'impossibilité de les comparer avec les otolithes composés d'aragonite.

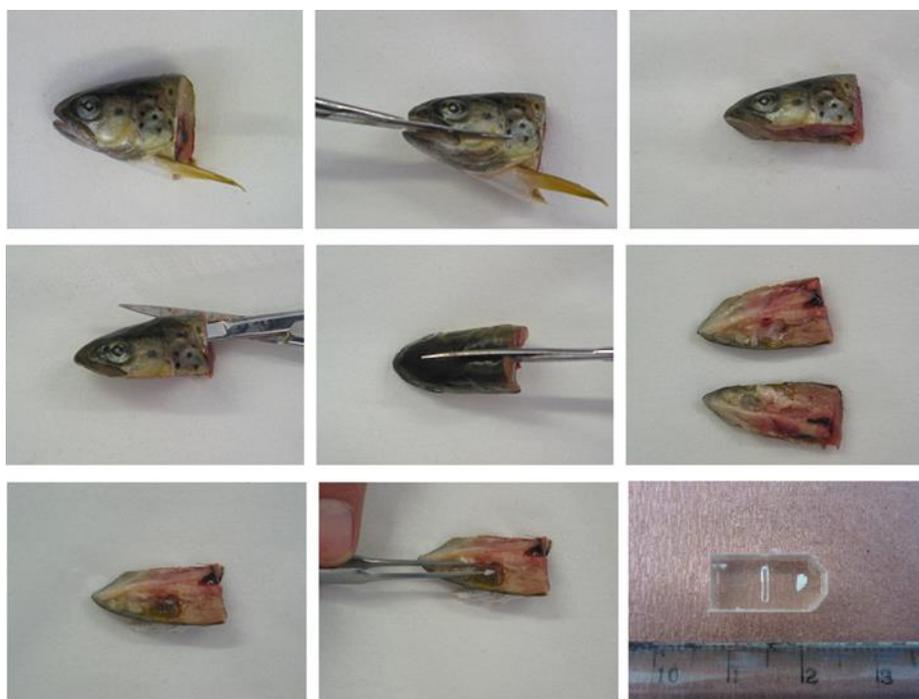


Figure 2.7: Etapes de l'extraction des otolithes et otolithe inclus en résine Araldite

2.6 - Analyse élémentaire et isotopique du strontium

2.6.1 - Analyse des eaux

L'étude de faisabilité avait permis de vérifier qu'une relation claire existe entre la composition chimique de l'eau et celle de l'otolithe seulement pour trois paramètres, le Sr:Ca, le Ba:Ca et le rapport isotopique du strontium $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ (Caudron et al., 2015). Aussi, pour la suite de l'étude, les mesures de la composition chimique des eaux se sont principalement focalisées au niveau des 3 éléments chimiques calcium (Ca), strontium (Sr) et baryum (Ba) et du rapport des isotopes stables du Sr ($^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$). La composition en éléments chimiques des eaux a été déterminée par spectrométrie d'émission atomique à plasma induit (ICP-AES). L'analyse des isotopes du Sr a nécessité une étape préalable de séparation matricielle sur colonne via une résine échangeuse de cations pour éliminer les éléments chimiques interférents (cations majeurs et Rb). L'analyse du $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ a été réalisée par spectrométrie de masse multicollection à plasma induit (MC-ICP-MS).

2.6.2 - Analyse des otolithes

La composition des otolithes a été étudiée au niveau de 8 éléments chimiques : calcium (Ca), magnésium (Mg), manganèse (Mn), strontium (Sr), zinc (Zn), baryum (Ba), Cuivre (Cu) et Rubidium (Rb). Malgré l'absence de corrélation directe entre la composition chimique du milieu de vie et l'otolithe, les éléments Mn, Zn, Mg, Cu et Rb ont dans un premier temps été gardés en raison de leur potentiel caractère discriminant. Des différences dans le métabolisme des poissons en relation avec des conditions bio-physico-chimiques différentes selon les sites pouvaient en effet conduire à une incorporation différenciée selon les rivières. Néanmoins, après analyse le Rb et le Cu ont été exclus car détectés trop aléatoirement, et inférieurs à la limite de détection dans plus de 90% des mesures.

La composition microchimique des otolithes a été déterminée par ablation laser femtoseconde (Alafamet, Novalase, France) couplée à un spectromètre de masse à plasma induit (ICP-MS) pour les éléments et à un spectromètre de masse multicollection à plasma induit (MC-ICP-MS) pour l'isotopie.

L'ablation laser a consisté dans deux profils linéaires, l'un de 30 μm de large pour les éléments et l'autre de 100 μm de large pour l'isotopie du Sr (superposé à celui de l'élémentaire), les deux dans le plan sagittal selon un axe dorso-ventral qui a débuté 150 μm avant le nucléus (Fig. 2.8), avec une donnée tous les 25 μm .

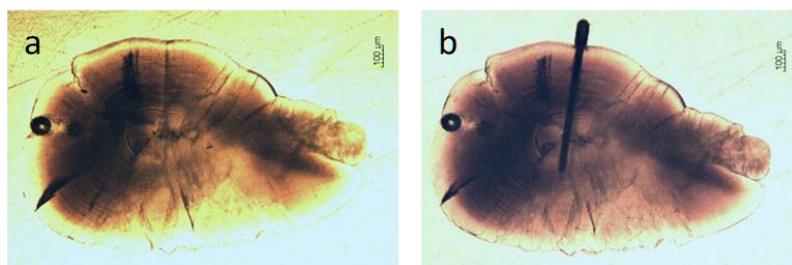


Figure 2.8 : Photographie d'un otolithe (a) avant et (b) après ablation laser.

La quantification des concentrations a été réalisée par calibration externe à partir de standards en solution pour les eaux et de verres certifiés (NIST 610, 612, 614) pour les otolithes selon la procédure décrite par Lannes-Lacrouts (2015).

Le profil de chaque individu a été observé afin de sélectionner la portion correspondant à la période de vie en rivière (Fig. 2.9) en excluant la portion du transect correspondant au développement embryolaire car elle contient la signature maternelle, qui n'est pas forcément en relation avec le milieu de vie au stade juvénile (Fig. 2.9). En général, la zone d'intérêt pour identifier l'origine natale est comprise entre 300 et 600 μm (en moyenne) du début des profils. Elle peut néanmoins être plus longue ou plus courte, ou démarrer avant ou après 300 μm , en fonction du taux de croissance et du temps passé en rivière de chaque individu. La zone retenue a donc été ajustée pour chaque individu. Le nombre de points utilisé dans les analyses statistiques pouvant alors être différent selon les individus.

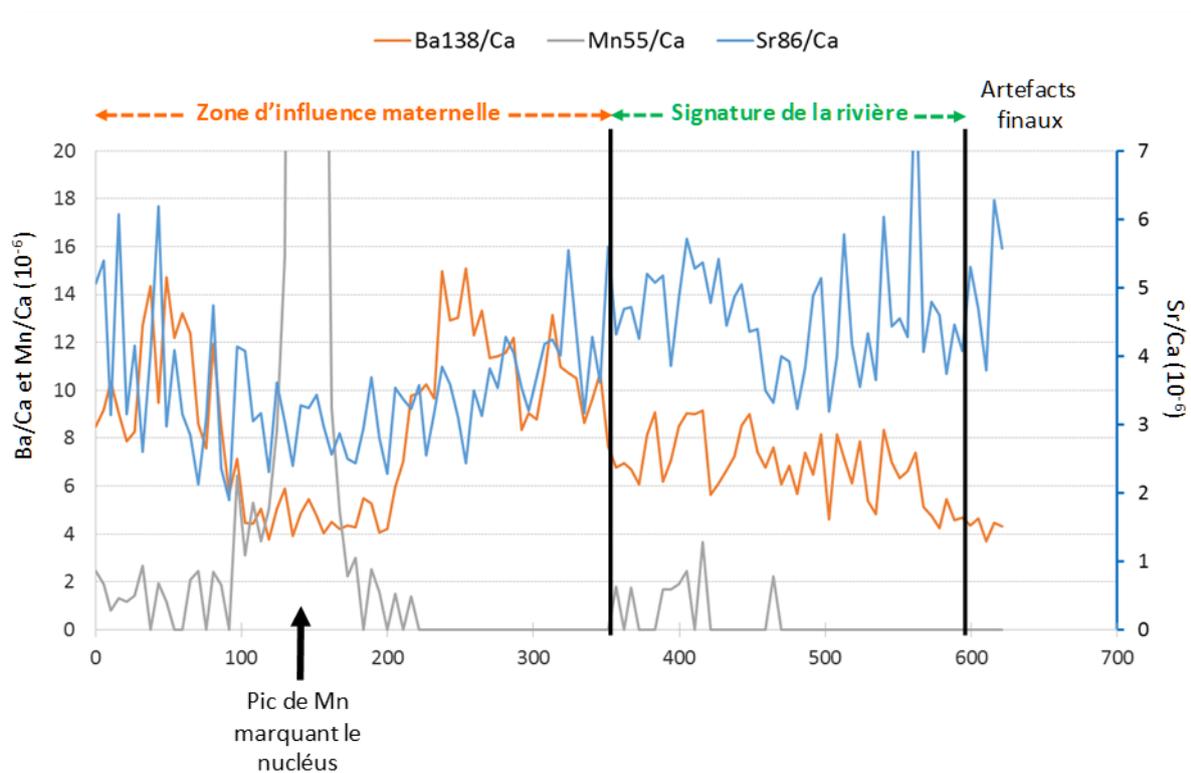


Figure 2.9: Exemple de profil obtenu sur un otolithes de truite juvénile et identification de la zone d'influence maternelle et de la signature rivière

2.7 - Analyses statistiques

Les données élémentaires/isotopiques ont globalement été analysées à l'aide d'une approche *Random Forest* (RF). La technique de *Random Forest* est un dérivé de la famille des arbres de classification et de régression (*CART*), méthodes utilisées pour modéliser et prédire les relations entre un ensemble de variables prédictives (données élémentaires/isotopiques) et une seule variable réponse (Rivière d'origine, Breiman, 2001). Contrairement aux méthodes paramétriques traditionnellement utilisées (analyses discriminantes linéaires, quadratiques *etc.*), cette approche non paramétrique ne nécessite pas de faire d'hypothèse *a priori* concernant la relation prédicteur-réponse, offrant ainsi la possibilité de modéliser des relations complexes et non linéaires impliquant des interactions profondes issues de données bruitées (Cutler *et al.* 2007). L'utilisation de cette méthode pour des données microchimiques est venue confirmer ses performances (Mercier *et al.* 2011).

Le principe général consiste d'abord à établir un modèle discriminant basé sur les données des truites juvéniles dont l'origine est connue. Puis ce modèle est utilisé pour déterminer l'origine natale des truites adultes capturées dans le lac. Toutes les données élémentaires et isotopiques à dispositions ont initialement été utilisées. La figure 2.10 illustre la succession des étapes réalisées au cours de cette étude.

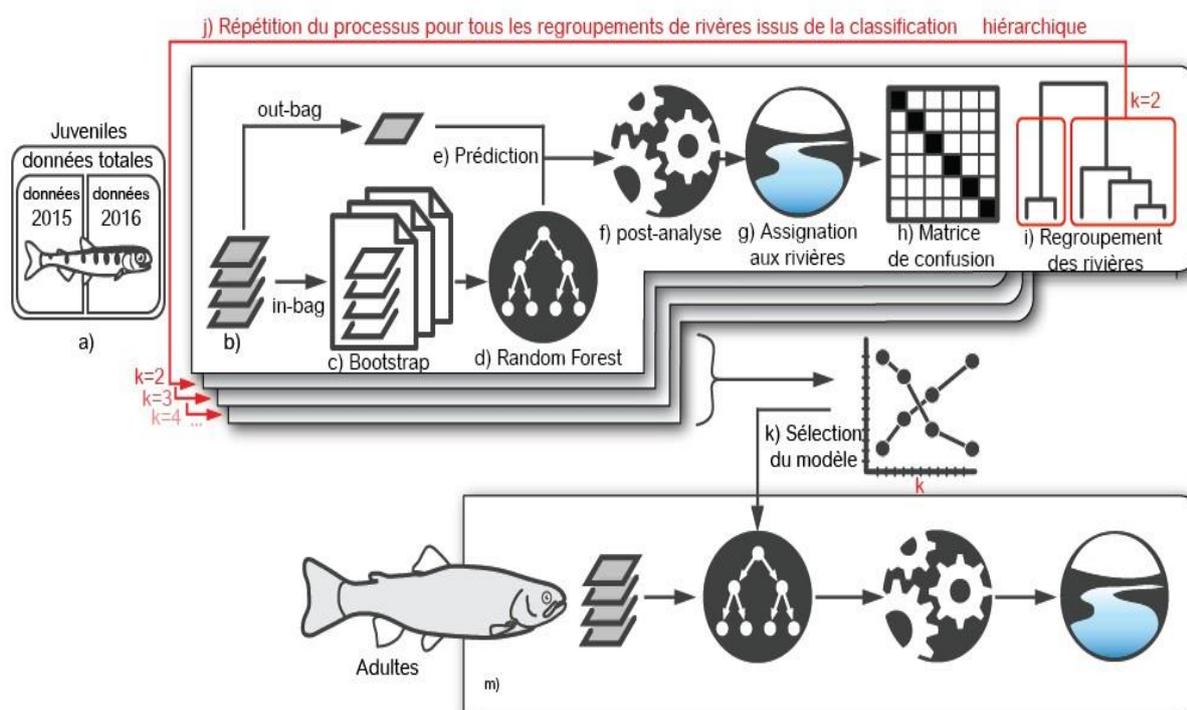


Figure 2.10 : Succession des étapes d'analyse réalisées.

Les différentes étapes de l'approche statistique se décomposent de la manière suivante :

a) *Compilation du jeu de données complet pour les juvéniles* : Une donnée correspond à une mesure 'multiélémentaire + isotopique' en un point de l'otolithe. Toutes les données juvéniles ont été utilisées sans distinction de cohorte, afin de générer l'analyse discriminante la plus généraliste possible.

b) **Construction du modèle discriminant** : De façon à évaluer les performances du modèle, seule une fraction des données initiales (environ $\frac{3}{4}$ des données, appelées 'in-bag') a été utilisée pour construire le modèle discriminant. La fraction restante ('out-bag') utilise le modèle ainsi construit pour prédire l'origine des poissons. Cette prédiction est comparée à l'origine réelle des individus afin d'en évaluer les performances.

c) **Evaluation de la robustesse du modèle par bootstrap** : Afin de s'assurer de la robustesse du modèle, l'étape précédente a été réitérée 1000 fois de façon indépendante.

d) **Analyse discriminante par Random Forest** : Il s'agit d'une approche aggrégative (bagging) appliquée aux arbres de classification. Il consiste à faire la moyenne des prévisions de plusieurs modèles indépendants pour réduire l'erreur de classification

e) **Prédiction (assignation des données)** : Pour chaque donnée de la fraction out-bag ($\frac{1}{4}$ des données initiales), le modèle construit est utilisé pour prédire le groupe de rivières associées.

f) **Post-traitement** : la procédure de prédiction réalisée indépendamment sur chaque donnée d'un transect d'otolithe aboutit parfois à des prédictions isolées au sein d'un transect homogène (Fablet *et al.* 2007). Nous avons appliqué une procédure de correction (Teichert *et al.*, 2018), de manière à réduire les attributions isolées et maximiser la vraisemblance. Une telle correction n'a été réalisée que chez les individus caractérisés par un minimum de trois données.

g) **Assignation des individus** : À l'issue de cette correction, il est possible d'attribuer pour chaque truite juvénile un ou plusieurs groupes de rivières d'origines.

h) **Matrice de confusion** : Seules les truites juvéniles ayant des attributions uniques (toutes les données d'un transect attribuées à la même rivière) ont été conservées. Le détail des attributions erronées (pourcentage) est répertorié sous forme d'une matrice de confusion entre rivières.

i) **Regroupement des rivières** : La matrice de confusion générale permet de procéder à une classification hiérarchique des rivières. Lorsque la discrimination entre deux rivières est peu aisée (grande erreur d'attribution entre elles), le regroupement de ces rivières améliore la capacité discriminante du modèle mais diminue la résolution spatiale. Nous avons ainsi pu établir de façon hiérarchique les regroupements de rivières les plus pertinents.

j) **Répétition du processus** : Toutes les étapes b→h ont été reproduites en utilisant un nombre variable de regroupements, allant de deux ensembles de rivières (résolution spatiale la plus faible, mais erreur d'attribution faible) jusqu'à une tentative de discrimination de toutes les rivières (résolution spatiale la plus forte, mais avec une erreur d'attribution importante).

k) **Sélection du modèle** : Tous les modèles ainsi réalisés ont pu être comparés afin de sélectionner celui présentant le meilleur compromis entre sa résolution spatiale et sa capacité prédictive.

l) **Application aux adultes** : Le modèle retenu a enfin été appliqué aux données adultes et permet d'assigner, après traitement, une(des) rivière(s) d'origine à chaque poisson.

3. Résultats

3.1 - Composition géochimique des eaux des affluents du Léman

Les analyses effectuées en 2015 ont montré que des relations eau-otolithe étaient significatives pour un nombre limité de rapports d'éléments : Sr:Ca, Ba:Ca, Sr :Ba et $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr (Figure 3.1, exemple du Sr :Ca et du $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr ; voir Caudron et al., 2015). Pour ce qui est des rapports Mg:Ca et Mn:Ca, l'influence de facteurs physiologiques conduit à l'absence de relations claires entre l'eau et l'otolithe (Fig. 3.2). Dans ces conditions, seuls ces 4 ratios ont fait l'objet d'étude de variabilité saisonnière au cours des 3 campagnes de prélèvements d'eau.

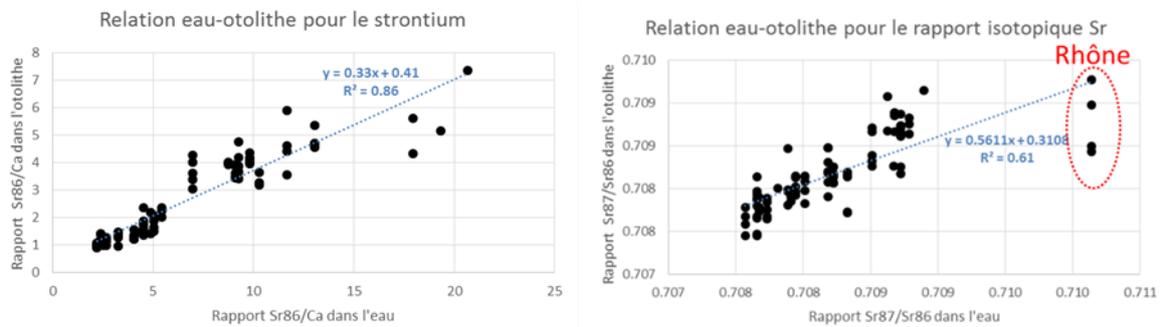


Figure 3.1: Exemples de relations eau-otolithe pour les ratios Sr:Ca et $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr

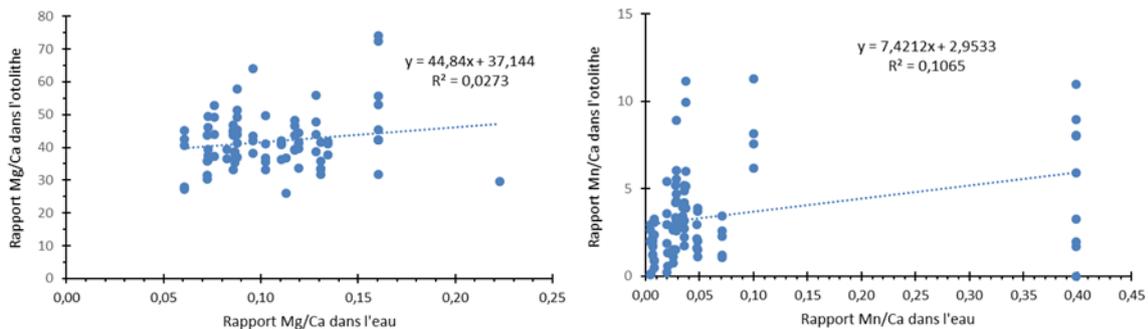


Figure 3.2: Exemples d'absence de relation eau-otolithe pour les ratios Mg:Ca et Mn:Ca

Les analyses d'eaux réalisées sur les prélèvements de l'été et l'automne 2016 sont globalement en accord avec celles du printemps 2015. Les différences observées entre rivières ou groupes de rivières en 2015 sont conservées en 2016. Certaines rivières enregistrent cependant une variabilité interannuelle et/ou saisonnière parfois marquée pour certains paramètres comme en témoignent les écart-types sur la figure 3.3. Dans le cas du ratio Sr:Ca, seules deux rivières sont caractérisées par une variabilité prononcée, la Dranse et le Rhône. A l'exception de la Versoix, du Pamphiot, du Redon et du Rhône, le Ba:Ca est quant à lui caractérisé par une variabilité saisonnière relativement marquée sur

toutes les autres rivières. A l'inverse, le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$) présente une stabilité saisonnière assez remarquable, même s'il apparaît un peu plus variable dans le Rhône et l'Aubonne.

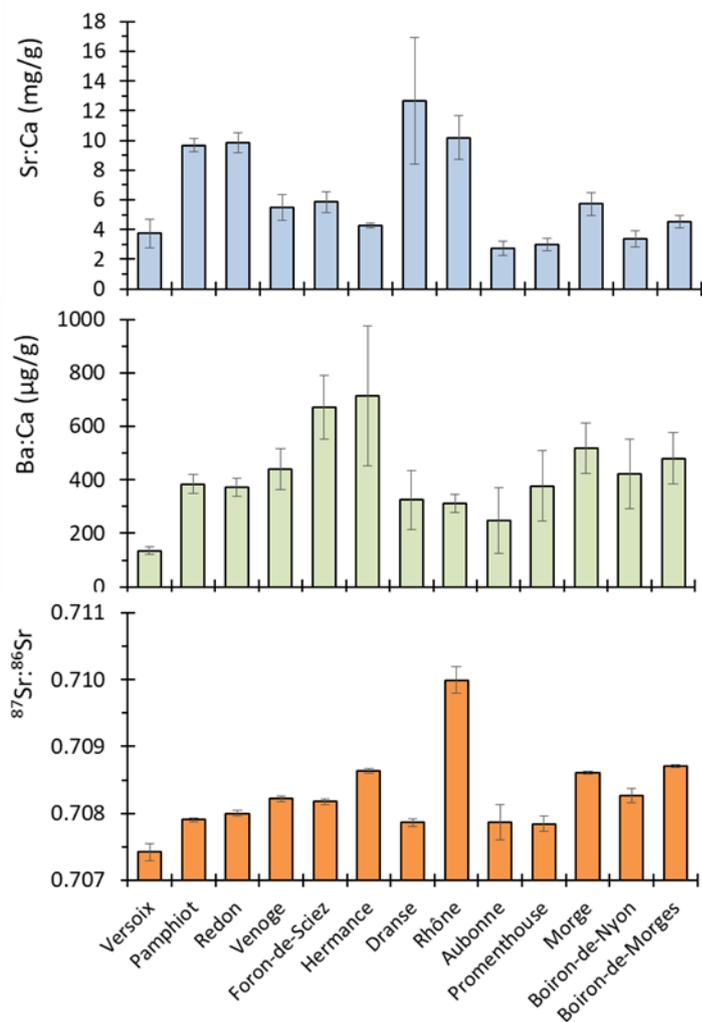


Figure 3.3 : Moyenne et écart-type de la composition chimique des eaux en Sr:Ca, Ba:Ca et $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$ pour 3 campagnes de prélèvements (printemps 2015 ; été et automne 2016) sur les 13 affluents du Léman retenus. Le rapport Sr:Ba étant le résultat du rapport de (Sr:Ca)/(Ba:Ca), il n'est pas présenté dans cette figure.

Il faut aussi noter à ce stade que des regroupements de cours d'eau semblent se dessiner à la lecture des résultats de l'ACP effectuée en combinant les données chimiques des eaux sur la base des 6 paramètres quantifiables dans les otolithes, Sr:Ca, Ba:Ca, Sr:Ba, Mg:Ca, Mn:Ca et $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$ (Figure 3.4). Ce résultat préliminaire souligne le pouvoir discriminant des ratios élémentaires et isotopiques analysés, dans la différenciation des cours d'eau étudiés, même si les regroupements ne sont pas forcément ceux observés dans les otolithes. Ceci peut découler du fait que Mn:Ca et Mg:Ca dans les otolithes ne résultent pas des concentrations ambiantes des eaux mais de processus physiologiques.

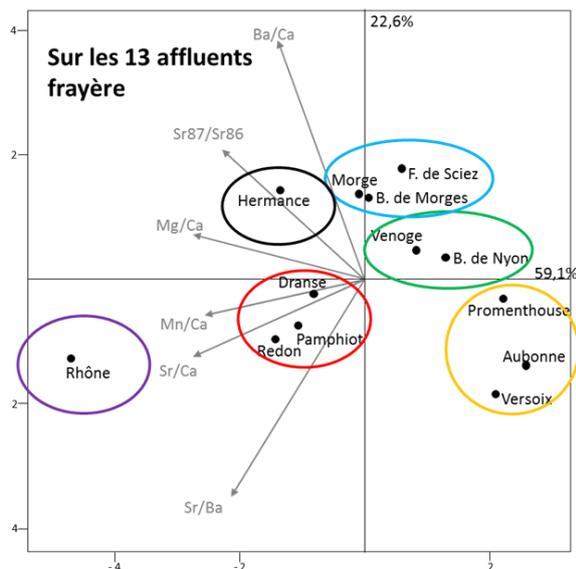


Figure 3.4 : Projection en ACP des 6 principaux ratios d'éléments mesurés dans l'eau des 13 affluents principaux lors de la campagne de mars 2015

3.2 - Composition géochimique des eaux des affluents des lacs d'Annecy, du Bourget et du Sautet.

Les résultats des analyses de la composition chimique des eaux en Sr:Ca, Ba:Ca et $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr des affluents du lac d'Annecy (8 affluents : Bluffy, Angon, Eau morte, Ire, Bornette, Entrevernes, Laudon, Planche), du Bourget (2 affluents : Sierroz, Leysse) et du Sautet (2 affluents : Souloise, Drac) sont présentées sur la figure 3.5.

Pour le lac d'Annecy, en première approximation 1 rivière individuelle (Entrevernes) et 2 groupes d'affluents semblent se distinguer via le rapport Sr:Ca, groupe 1 (Bluffy, Angon, Eau morte, Ire) et groupe 2 (Bornette, Laudon, Planche). Lorsqu'on s'intéresse au Ba:Ca, le groupe 1 pourrait être raisonnablement découpé en 2 nouveaux groupes, Bluffy + Eau morte et Angon + Ire. L'isotopie n'étant pas discriminante pour le groupe 1. En ce qui concerne le groupe 2, l'isotopie et le Ba:Ca permettent de discriminer l'affluent Bornette de Laudon + Planche. Ces deux derniers affluents pourraient être à priori différenciés via le rapport Ba:Ca.

Pour le lac du Bourget, les eaux des deux affluents Sierroz et Leysse semblent se différencier significativement via le rapport Sr:Ca, alors que le Ba:Ca ne serait pas discriminant. L'isotopie du Sr ($^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr) ressort quant à elle comme légèrement discriminante.

En ce qui concerne le lac du Sautet, il n'existe pas de différence significative au niveau de la composition élémentaire des eaux (Sr:Ca et Ba:Ca) entre la Souloise et le Drac. Par contre, une différence semble significative au niveau de l'isotopie ($^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr).

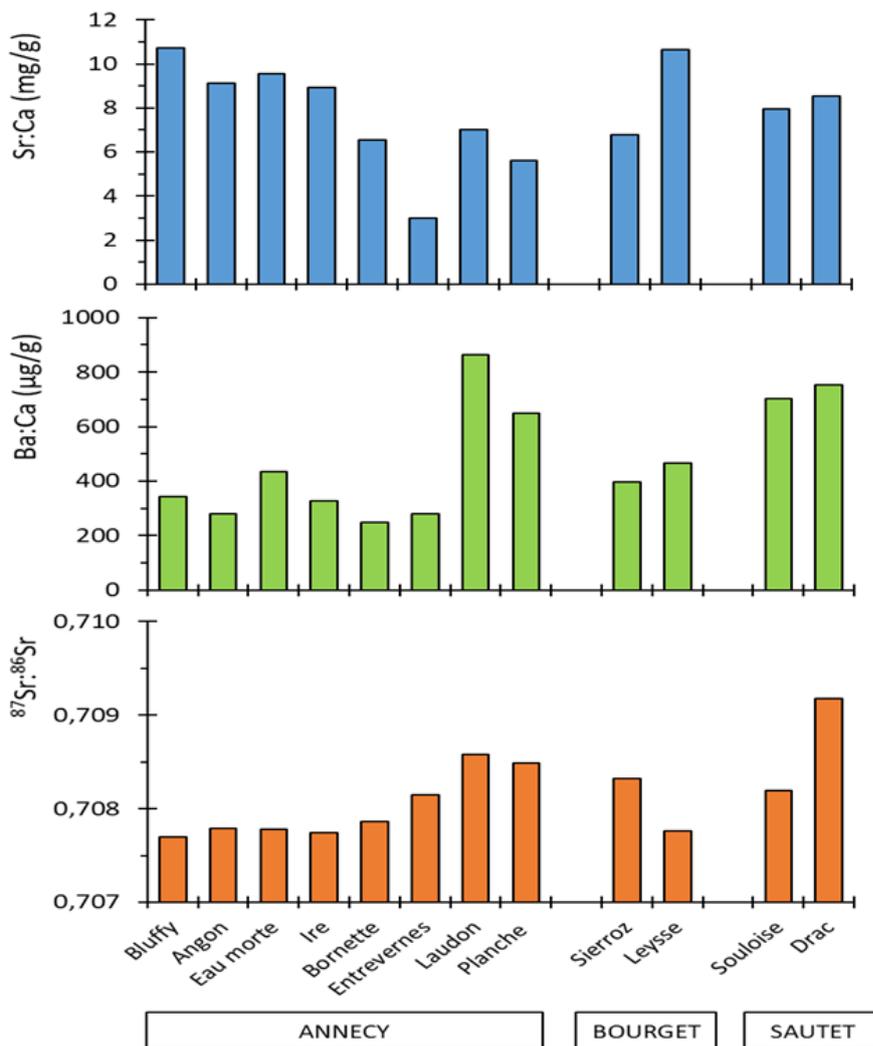


Figure 3.5 : Composition chimique des eaux en Sr:Ca, Ba:Ca et ⁸⁷Sr:⁸⁶Sr pour les 8 affluents du lac d'Annecy, les 2 affluents du lac du Bourget et les 2 affluents du lac du Sautet.

Il est également important de signaler à ce stade que les regroupements de cours d'eau obtenus à partir des otolithes par analyse discriminante avec Random Forest (voir ci-après) sont dans l'ensemble assez cohérents avec les regroupements qui seraient obtenus en combinant les données chimiques des eaux sur la base des 4 paramètres Sr:Ca, Ba:Ca, Sr:Ba et ⁸⁷Sr:⁸⁶Sr. Et ceci même si des éléments incorporés dans les otolithes sans lien direct avec leur chimie ambiante (Mn, Mg) sont inclus dans l'analyse biostatistique des otolithes. Ce résultat souligne le poids important des 4 paramètres Sr:Ca, Ba:Ca, Sr:Ba et ⁸⁷Sr:⁸⁶Sr dans la discrimination des cours d'eau étudiés.

3.3 - Assignment des juvéniles

3.3.1 - Sélection des paramètres discriminants

Les différents essais de regroupements des affluents par l'approche *Random Forest* en se basant sur une sélection de différents paramètres isotopiques et élémentaires, montrent l'importance de la prise en compte de 6 paramètres (courbe verte foncée Fig. 3.6) : Sr:Ca, Ba:Ca, Sr:Ba, $^{87}\text{Sr}^{86}\text{Sr}$, Mn:Ca et Mg:Ca. Les autres paramètres (Zn:Ca et Cu:Ca) n'apportent pas de pouvoir discriminant supplémentaire, tant en terme d'erreur de classification qu'en terme de probabilité d'assignation unique des poissons analysés. Ces éléments ne sont donc pas conservés dans la suite de l'analyse.

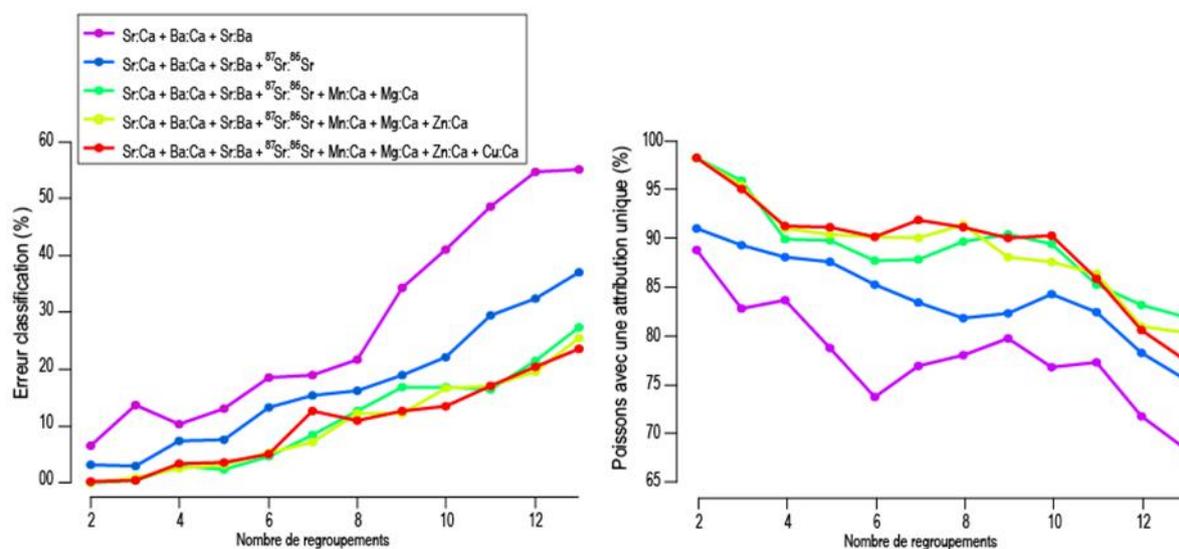


Figure 3.6 : Erreur de classification (%) et proportion (%) des poissons ayant été attribués à une seule rivière en fonction du nombre des regroupements de rivières pour plusieurs combinaisons de données élémentaires/isotopiques.

3.3.2 - Résultats de l'analyse discriminante avec Random Forest pour le Léman

La classification hiérarchique des 13 rivières, obtenue à partir des analyses microchimiques des juvéniles d'origine connue, indique un taux moyen de reclassement incorrect de 26% (Figure 3.7). Toutefois, le regroupement de rivières dont les juvéniles présentent des signatures microchimiques proches permet de réduire l'erreur de classification. La figure 3.7 illustre pour un nombre de groupes fixés, le regroupement de rivières présentant le maximum de vraisemblance.

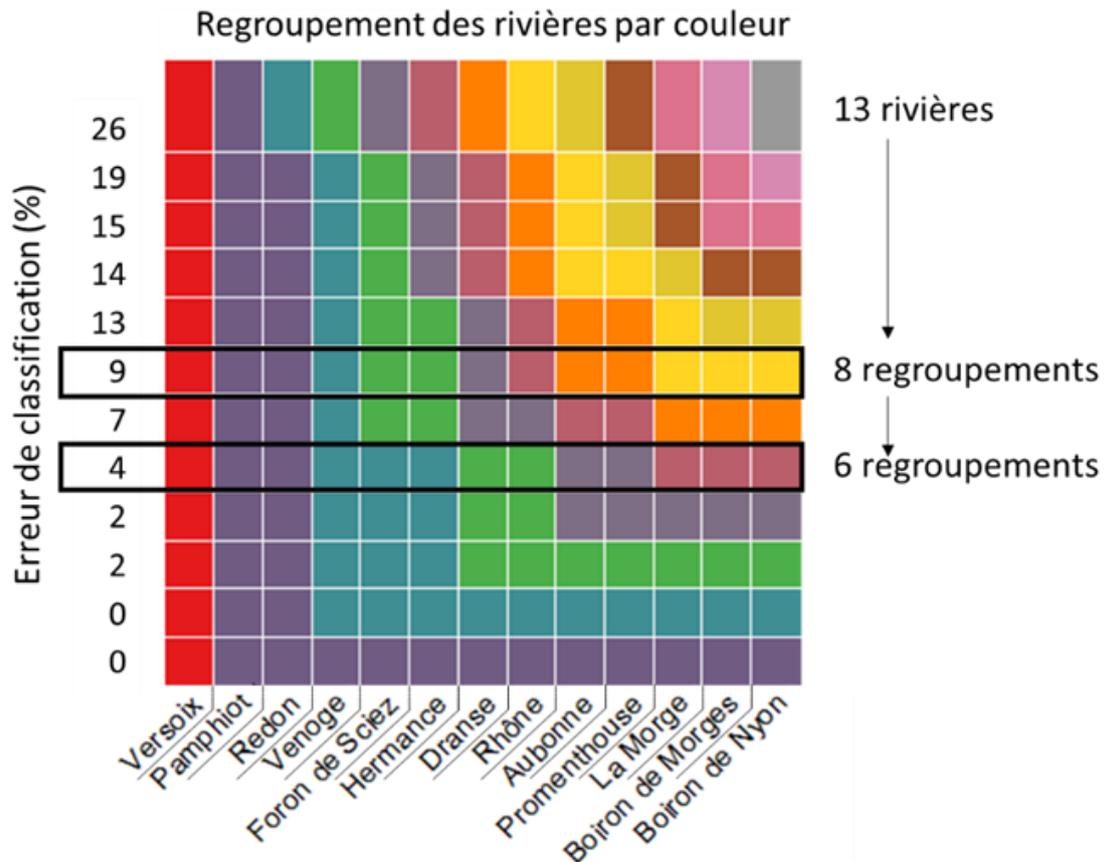


Figure 3.7 : Résultats de l’analyse discriminante avec Random Forest sur la base des signatures microchimiques des otolithes de juvéniles. Chaque ligne représente un regroupement de rivières à l’aide de codes couleurs, à partir de 2 groupes (ligne du bas) jusqu’à 13 groupes (ligne du haut). L’erreur de classification associée est indiquée à gauche.

En respectant cette classification hiérarchique, la discrimination de 8 groupes de rivières peut être réalisée avec une erreur globale d’assignation des juvéniles de l’ordre de 9.8% (Fig. 3.8). Ce niveau de regroupement permet la distinction des deux affluents principaux que sont la Dranse et le Rhône. Une alternative, moins discriminante consiste à retenir 6 regroupements de rivières, avec un taux d’erreur inférieur à 5% (Fig. 3.8).

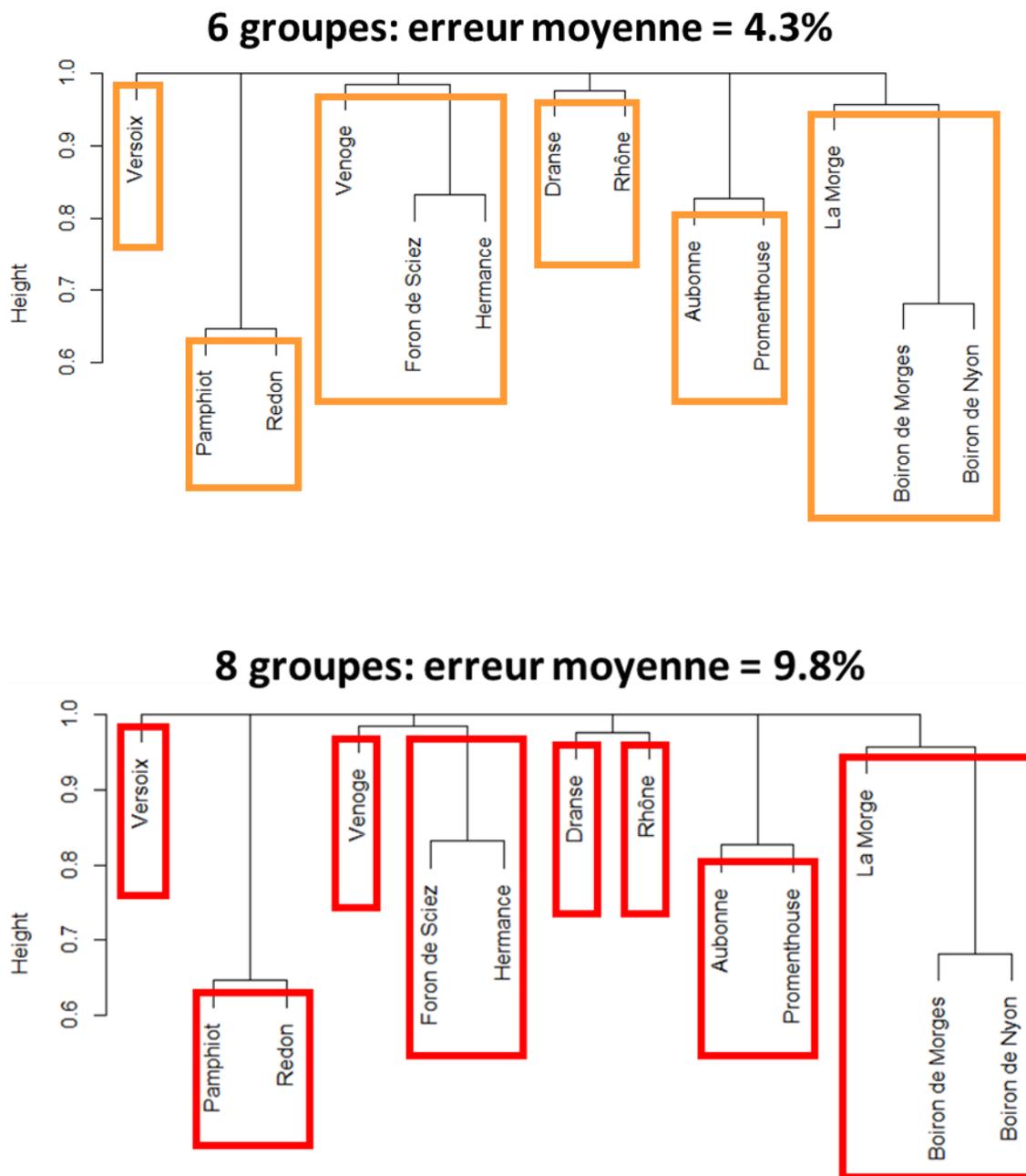


Figure 3.8 : Classification hiérarchique en 6 et 8 groupes des 13 rivières principales à partir de la microchimie des otolithes des truites juvéniles du Léman.

3.3.2.1- Justification du choix des groupes :

La répartition en 6 groupes semble être un bon compromis tant au niveau de l'erreur d'assignation (OOB error < 5%) qu'au niveau de la probabilité d'assignation de tous les points d'un même otolithe à une seule et même rivière (proche de 88%) (Figure 3.9). Néanmoins ce choix ne permet pas de différencier la Dranse du Rhône. Une telle séparation n'est permise qu'avec 8 regroupements de

rivières et une erreur associée de 10%. Le nombre de juvéniles présentant une assignation unique reste quasi-inchangée entre 6 et 8 groupes, ce qui signifie que la probabilité d'obtenir plusieurs assignations d'un même individu sur la base de l'ensemble des points analysés sur l'otolithe n'augmente pas. La répartition en 8 groupes permet de surcroît de dissocier la Venoge d'un groupe constitué du Foron-de-Sciez et de l'Hermance (Figure 3.8), deux cours d'eau situés sur la rive française de l'autre côté du lac, alors que la Venoge est un tributaire situé sur la rive suisse (région de Lausanne). Un découpage supplémentaire en 9 ou 10 groupes ne semble pas pertinent ; il entraînerait une hausse significative de l'erreur de reclassification (autour de 15%), ce qui augmenterait *in fine* l'incertitude dans l'assignation des adultes.

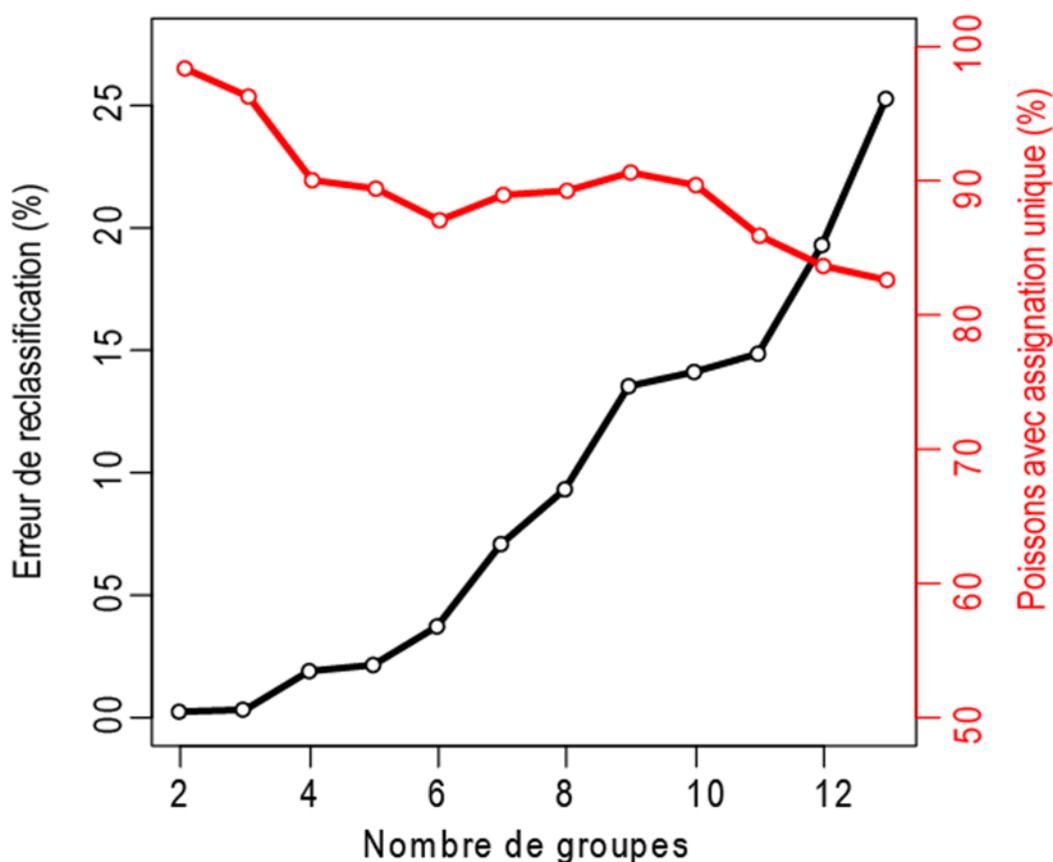


Figure 3.9 : Evolution de l'erreur de reclassification (points noirs) et du pourcentage de poissons avec assignation unique (points rouges) en fonction du nombre de regroupements de rivières.

3.3.2.2 - Nombre de points utilisés pour l'assignation :

L'ensemble des points d'analyses microchimiques réalisées sur les transects d'otolithes ont été conservés pour les analyses discriminantes. Le nombre de points médian utilisés pour l'assignation à 1 rivière unique diffère peu, selon que l'on s'intéresse à 6 ou 8 groupes (Figure 3.10). Il est d'environ 10 points.

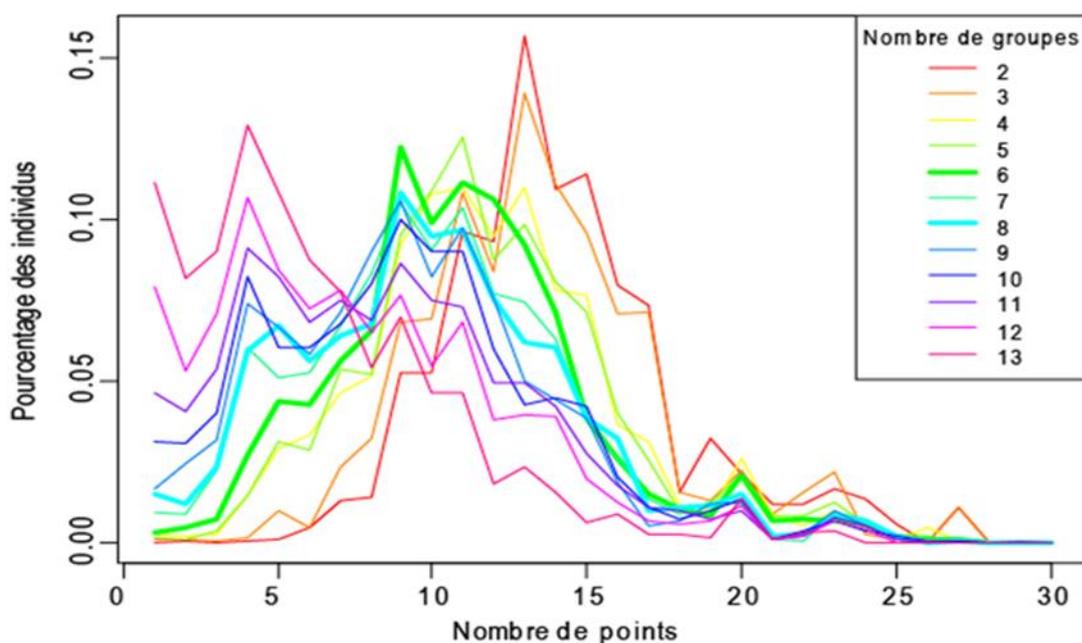


Figure 3.10 : Distribution du nombre de points utilisés pour les assignations uniques (une rivière) en fonction du nombre de regroupements de rivières. Les courbes correspondants à 6 et 8 groupes sont mises en évidence, respectivement en vert en et bleu.

Il est à noter que les juvéniles assignés à 1 seul groupe sur la base de seulement quelques points (<5) ne contribuent pas à augmenter l'erreur d'assignation. Ainsi, il sera cohérent de conserver tous les géniteurs assignés à 1 seul groupe de rivières, quel que soit le nombre de points utilisés pour l'assignation.

3.3.2.3 - Matrices de confusion (6-8 groupes) au niveau des individus :

Les matrices de confusion présentées ci-dessous intègrent deux niveaux d'informations : en ligne la justesse des attributions et en colonne la précision des attributions. La justesse correspond au % d'individus correctement attribués à leur rivière d'origine (diagonale) et au % d'individus de la rivière origine attribué à une autres rivières (ou groupe). La précision (lecture en colonne) donne le % des individus n'appartenant pas à une rivière d'origine donnée mais attribués à celle-ci par le modèle.

Cas de 8 groupes (Figure 3.11):

Quatre rivières ou groupes présentent une très bonne justesse d'attribution de l'origine (>90%) : « Aubonne + Promenthouse », « Pamphiot + Redon », Rhône, et Versoix ; 2 ont une justesse entre 80 et 90% (« Boiron de Morges + Boiron de Nyon + Morge », « Foron de Sciez + Hermance ») ; enfin les 2 rivières, Dranse et Venoge présentent des taux d'erreur d'attribution plus élevés (respectivement 25 et 22%, soit une justesse entre 75% et 78%).



Figure 3.11 : Matrice de confusion pour 8 groupes de rivières sur le Léman.

Cinq rivières ou groupes de rivières présentent une bonne précision d’attribution (>90%) : Versoix, Venoge, Rhône, « Foron de Sciez + Hermance », Dranse ; très peu d’individus non originaires de ces rivières y étant assignés par le modèle. A l’inverse, le groupe « Pamphiot + Redon » présente une précision d’attribution plus faible (75%) car 25% des poissons de la Dranse sont assignés à tort à ce groupe. Dans une moindre mesure, 12% des poissons de la Venoge et 8% de poissons du groupe « Foron de Sciez + Hermance » sont assignés au groupe « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + Morge », résultant dans une précision de 80% pour ce dernier groupe. Enfin, la précision du groupe « Aubonne + Promenthouse » est de 86%, quelques individus originaires des groupes « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + Morge » (9%), Venoge (4%) et « Foron de Sciez + Hermance » (1%) y étant assignés de façon erronée.

Cas de 6 groupes (Figure 3.12):

Le nombre de groupes diffère du précédent par le regroupement de la Dranse avec le Rhône, et de la Venoge avec Hermance et le Foron de Sciez. Les justesses sont en général >95%, sauf pour le groupe « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + La Morge » (85%).



Figure 3.12 : Matrice de confusion pour 6 groupes de rivières sur le Léman.

Les précisions sont aussi relativement élevées, 92% pour les groupes « Aubonne + Promenthouse » et « Foron de Sciez + Hermance », 95% pour les groupes « Pamphiot + Redon » et « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + La Morge », et 100% pour la Versoix et le groupe « Dranse + Rhône ».

3.3.2.4 - Variabilité temporelle des assignations des juvéniles

L'analyse discriminante ayant été réalisée à partir des échantillons d'otolithes prélevés en 2015 et 2016, il est intéressant d'évaluer dans quelle mesure la variabilité interannuelle influe sur la constitution des groupes. La Figure 3.13 représente la classification hiérarchique en 6 groupes (figure de gauche) et 8 groupes (figure de droite), à partir des données 2015 ou 2016, et compare ensuite la structuration des groupes entre les deux années. Dans la classification en 6 groupes, il ressort certaines similarités concernant des rivières ou groupes de rivières discriminés de manière identique dans les deux jeux de données (Versoix et groupe « Redon + Pamphiot »). A l'inverse, certaines rivières changent de groupe ; ainsi l'Hermance se rapproche du Foron de Sciez et de la Venoge en 2015, alors qu'elle rejoint un groupe constitué de 4 autres rivières en 2016 (Boiron de Nyon, Boiron de Morges, Promenthouse, Aubonne).

Avec 8 groupes, on constate également des disparités dans la constitution des groupes. En effet 3 groupes sont identiques : Versoix, « Redon + Pamphiot », et « Promenthouse + Aubonne ». La Dranse et le Rhône sont bien différenciés en 2016, alors qu'ils constituent un seul groupe en 2015. Les regroupements des autres rivières sont davantage hétérogènes entre les deux années.

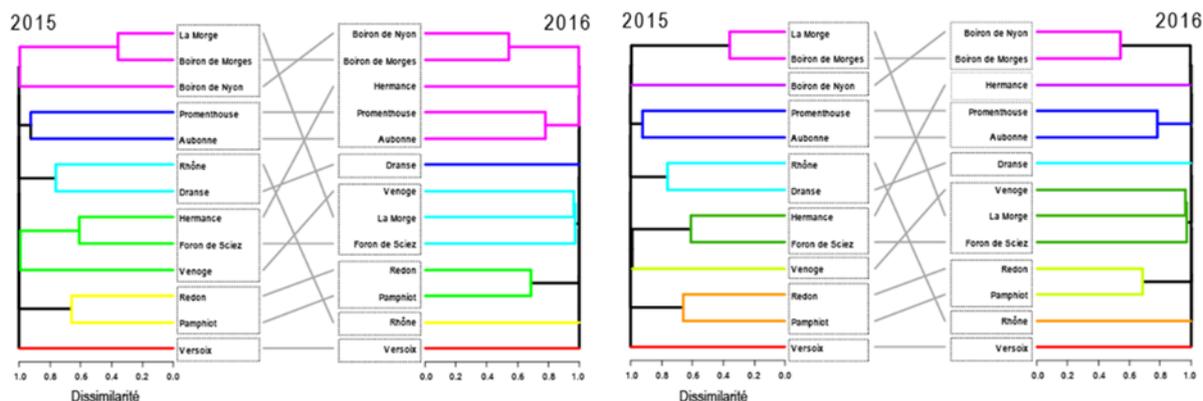


Figure 3.13 : Classifications hiérarchiques des juvéniles en 6 et 8 groupes de rivières, établies par année (2015 et 2016)

Quel que soit le nombre de regroupements considérés, la variabilité interannuelle est susceptible de modifier la façon de regrouper les rivières. La classification appliquée (Figure 3.8) est par conséquent une moyenne pluriannuelle ; pour davantage de précision, il faudrait idéalement disposer d'un modèle par cohorte, ce qui paraît difficilement réalisable en pratique. Néanmoins, malgré cette variabilité, le modèle global obtenu présente un bon pouvoir prédictif.

3.3.3 - Résultats de l'analyse discriminante avec Random Forest pour les lacs d'Annecy, Bourget et Sautet.

Annecy :

La classification hiérarchique des 8 affluents du lac d'Annecy, obtenue à partir des analyses microchimiques des juvéniles d'origine connue, indique un taux moyen de reclassement incorrect de 17% (Figure 3.14). Toutefois, le regroupement en 6 groupes de rivières dont les juvéniles présentent des signatures microchimiques proches permettrait de réduire l'erreur de classification à 10.5% avec plus de 90% des individus assignés à une rivière ou un groupe de rivières unique (Fig. 3.14 et 3.15). Dans ce cas, les cours d'eau Bluffy et Eau morte, Angon et Ire, ne seraient pas différenciables et regroupés en 2 groupes d'affluents (Fig 3.14). Ceci est en accord avec les résultats de la composition chimique des eaux sur la base du Sr:Ca , Ba:Ca, Sr :Ba et $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr .

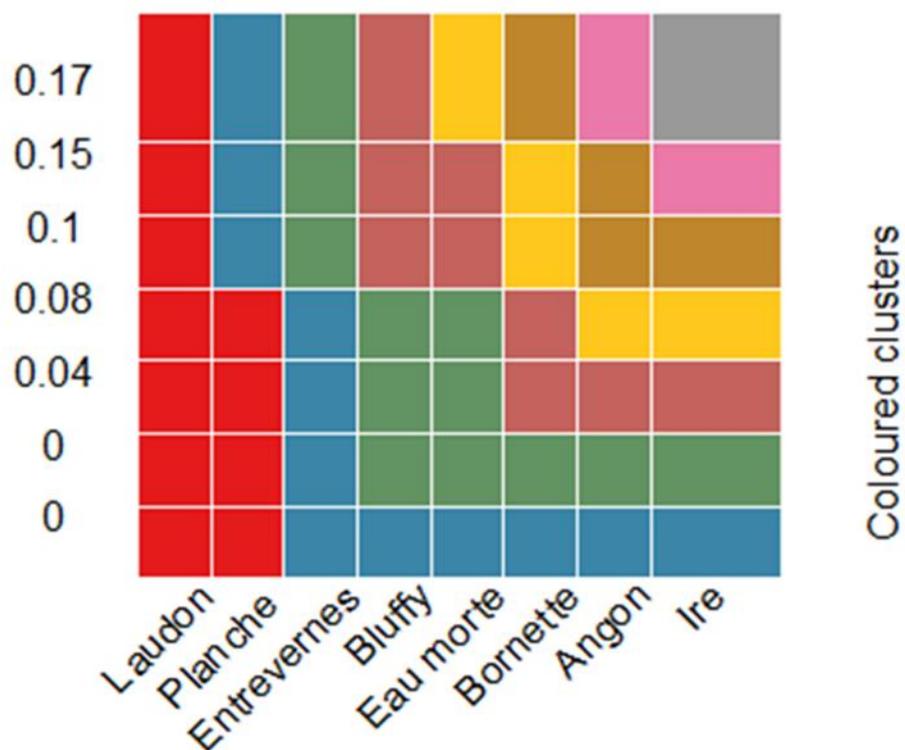


Figure 3.14 : Résultats de l'analyse discriminante avec Random Forest sur la base des signatures microchimiques des otolithes de juvéniles. Chaque ligne représente un regroupement de rivières à l'aide de codes couleurs, à partir de 2 groupes (ligne du bas) jusqu'à 8 groupes (ligne du haut). L'erreur de classification associée est indiquée à gauche.

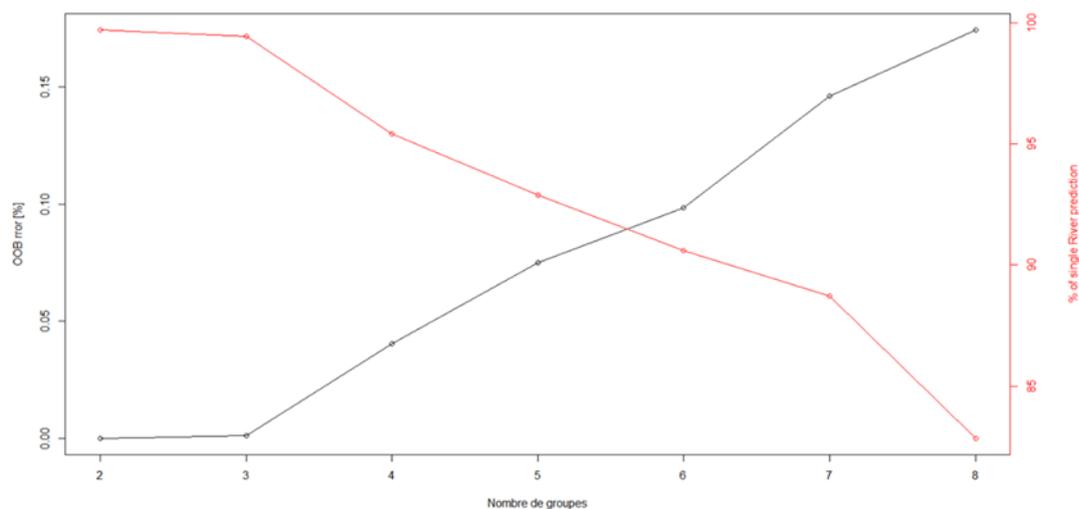


Figure 3.15 : Erreur et % d'attribution unique (une rivière) en fonction du nombre de regroupements pour les 8 affluents du lac d'Annecy.

Le regroupement des 8 affluents du lac d'Annecy en 6 groupes permet d'aboutir à des taux de justesse relativement élevés dans l'attribution d'une origine (Fig. 3.16) : 84% pour « Angon + Ire », 86% pour Bornette, 92% pour « Bluffy + Eau morte », 96% pour La Planche et 100% pour Entrevernes. Seul le

Laudon présente un taux de justesse moindre (79%), car 21% des individus originaires de cette rivière sont assignés au ruisseau de la Planche. En ce qui concerne la précision d'attribution d'une origine, elle est également élevée, 100% pour Entrevernes et Bornette, 96% pour Laudon, 84% pour « Bluffy + Eau morte », 79% pour la Planche et 78% pour « Angon + Ire ». Dans le cas de ce dernier groupe, ce sont des individus de « Bluffy + Eau morte » (8%) et Bornette (14%) qui sont incorrectement assignés à « Angon + Ire ». Enfin, 16% d'individus originaires du groupe « Angon + Ire » se voient attribuer une origine « Bluffy + Eau morte ». Plus marginalement, 4% d'individus de la Planche sont assignés de façon erronée au Laudon.



Figure 3.16 : Matrice de confusion avec regroupement des 8 affluents du lac d'Annecy en 6 groupes.

Bourget :

Sur le lac du Bourget, il n'y a que 2 affluents frayère, le Leysse et le Sierroz. L'analyse random forest sur la base des données microchimiques de 6 juvéniles du Leysse et 5 juvéniles du Sierroz, suggère comme pour l'eau que ces deux affluents sont différenciables avec un taux d'erreur <1% (Figure 3.17). Respectivement 100% et 98% des individus originaires du Sierroz et de la Leysse sont ré-attribués par le modèle à leur rivière d'origine, suggérant une très bonne discrimination des deux affluents.

	Leyse	Sierroz
Leyse	0.98	0.02
Sierroz	0.00	1.00

Figure 3.17 : Taux d'erreur d'assignation pour les juvéniles du Bourget.

Sautet :

Dans le cas du Sautet, il n'y avait aussi que 2 affluents, le Drac et la Souloise. L'analyse random forest sur la base des données microchimiques de 5 juvéniles du Drac et 5 juvéniles de la Souloise, suggère comme pour l'eau que ces deux affluents sont différenciables avec un taux d'erreur nul (Figure 3.18). 100% des individus sont correctement ré-attribués par le modèle à leur affluent d'origine.

	Drac	Souloise
Drac	1.00	0.00
Souloise	0.00	1.00

Figure 3.18 : Taux d'erreur d'assignation pour les juvéniles du Sautet.

3.4 - Assignation des adultes du Léman

La réassignation d'une origine natale a été réalisée sur 165 poissons adultes, capturés dans les 5 secteurs géographiques du lac Léman (voir figure 2.5), avec les 2 modèles d'assignation basés sur le regroupement de rivières en 6 et 8 groupes.

3.4.1 - Contribution des origines natales selon le modèle 6 groupes :

Sur les 165 poissons adultes capturés dans le Léman toutes zones géographiques confondues, le modèle 6 groupes a attribué une origine unique à 129 individus, une double assignation à 35 individus et aucune origine à 1 individu. La figure 3.19 présente la distribution en effectifs des 129 assignations à une origine unique.

Compte tenu de la justesse (85-100%) et de la précision (92-100%) du modèle 6 groupes, les contributions attribuées aux différents groupes sont supposées assez fiables. Les 6 groupes contribueraient tous mais à des degrés divers. Trois groupes se démarqueraient avec plus de 20% de contribution, « Dranse + Rhône » (24,48%), « Foron de Sciez + Hermance + Venoge » (22,95%) et « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + la Morge » (21,91%). Vient ensuite un groupe avec une contribution intermédiaire, le « Pamphiot + Redon » (14,95%). Le groupe « Aubonne + Promenthouse » et la Versoix présenteraient des contributions moindres avec 9,07% et 6,64% respectivement.

Compte tenu de la justesse et précision du modèle vis à vis de chaque origine, les contributions des groupes « Pamphiot + Redon » et « Aubonne + Promenthouse » pourraient être potentiellement surestimées de 2% et 2,5% respectivement. Inversement, les contributions des groupes « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + la Morge » et de « Dranse + Rhône » pourraient être potentiellement sous-estimées de 4% et 2% respectivement. Le groupe « Foron de Sciez + Hermance + Venoge » pourrait être aussi bien surestimé que souestimé d'environ 3%.

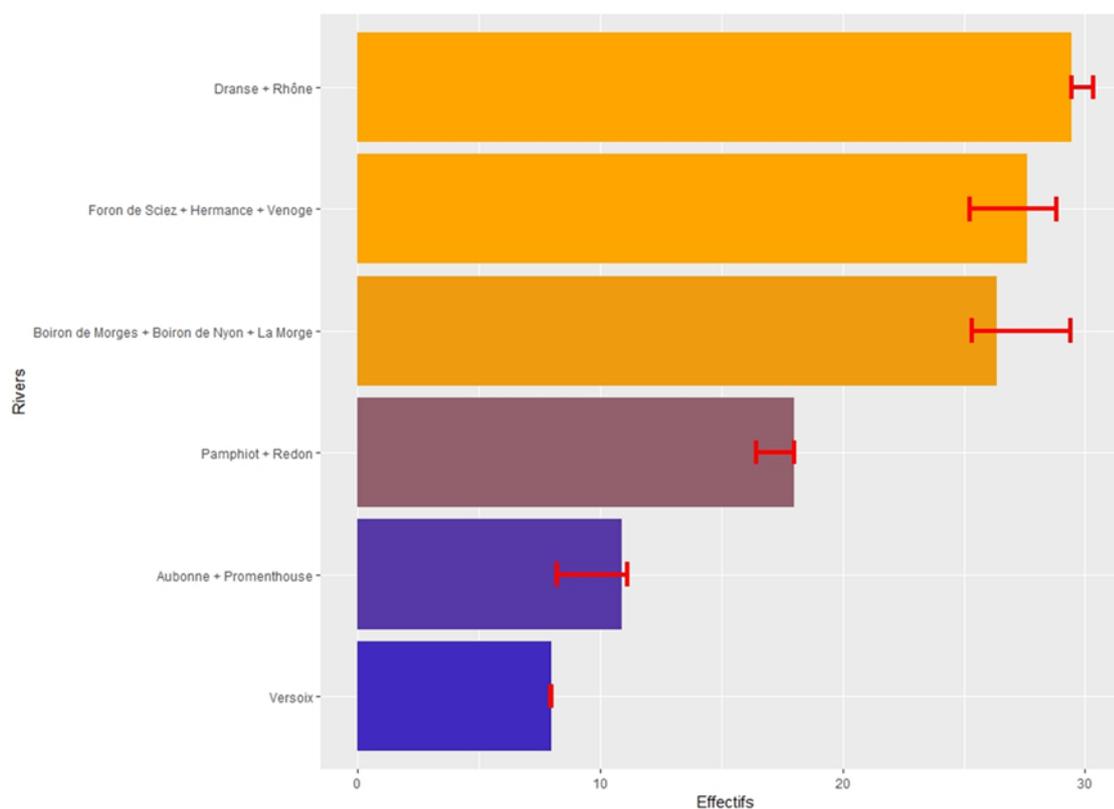


Figure 3.19 : Nombre (SD) d'individus adultes attribués à chaque groupe, cas de 6 groupes.

3.4.2 - Contribution des origines natales selon le modèle 8 groupes :

Sur les 165 poissons adultes capturés dans le lac Léman, le modèle 8 groupes a attribué une origine unique à 120 individus, une double assignation à 38 individus et aucune origine à 7 individus. La figure 3.20 présente la distribution en effectifs des 120 assignations à une origine unique. L'intérêt majeur de cette configuration à 8 groupes consiste en une différenciation plus fine avec, d'une part, séparation de la Dranse et du Rhône, et d'autre part, de la Venoge et du groupe « Foron de Sciez + Hermance ». Ce schéma de discrimination de l'origine natale présente par ailleurs une cohérence géographique plus nette qu'avec 6 groupes, la plupart des regroupements correspondant en effet à des affluents localisés dans des secteurs géographiques proches, à l'exception du Boiron de Nyon avec le Boiron de Morges et la Morge.

Le modèle 8 groupes apparaît également robuste mais avec des justesses (75-100%) et des précisions (74-100%) un peu moins bonnes que pour 6 groupes, en particuliers au niveau de la Venoge et la Dranse (justesse) et « Pamphiot + Redon », « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + La Morge » (Précision).

Comme pour 6 groupes, les 8 origines natales contribueraient toutes mais à des degrés divers (Figure 3.20). Le groupe « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + la Morge » présente la contribution la plus importante (26.21%), suivi du groupe « Pamphiot + Redon » (21,13%) et du Rhône (14,02%). La Venoge et le groupe « Aubonne + Promenthouse » viennent avec ensuite avec des contributions similaires, 10,02% respectivement. Enfin, Versoix, « Foron de Sciez + Hermance » et Dranse contribueraient le moins au recrutement de truite lacustre dans le lac Léman, 7,34%, 6,45% et 4,82% respectivement.

Cependant, compte tenu des justesses et précisions données par le modèle 8 groupes dans l'attribution des différentes origines natales, les contributions des cours d'eau Venoge, Dranse et « Foron de Sciez+Hermance » pourraient être sous-estimées dans des proportions d'environ 6%, 6% et 4% respectivement.

A l'inverse, les contributions des groupes « Pamphiot + Redon », et « Aubonne + Promenthouse » pourraient être surestimées de 4% et 4,3% respectivement.

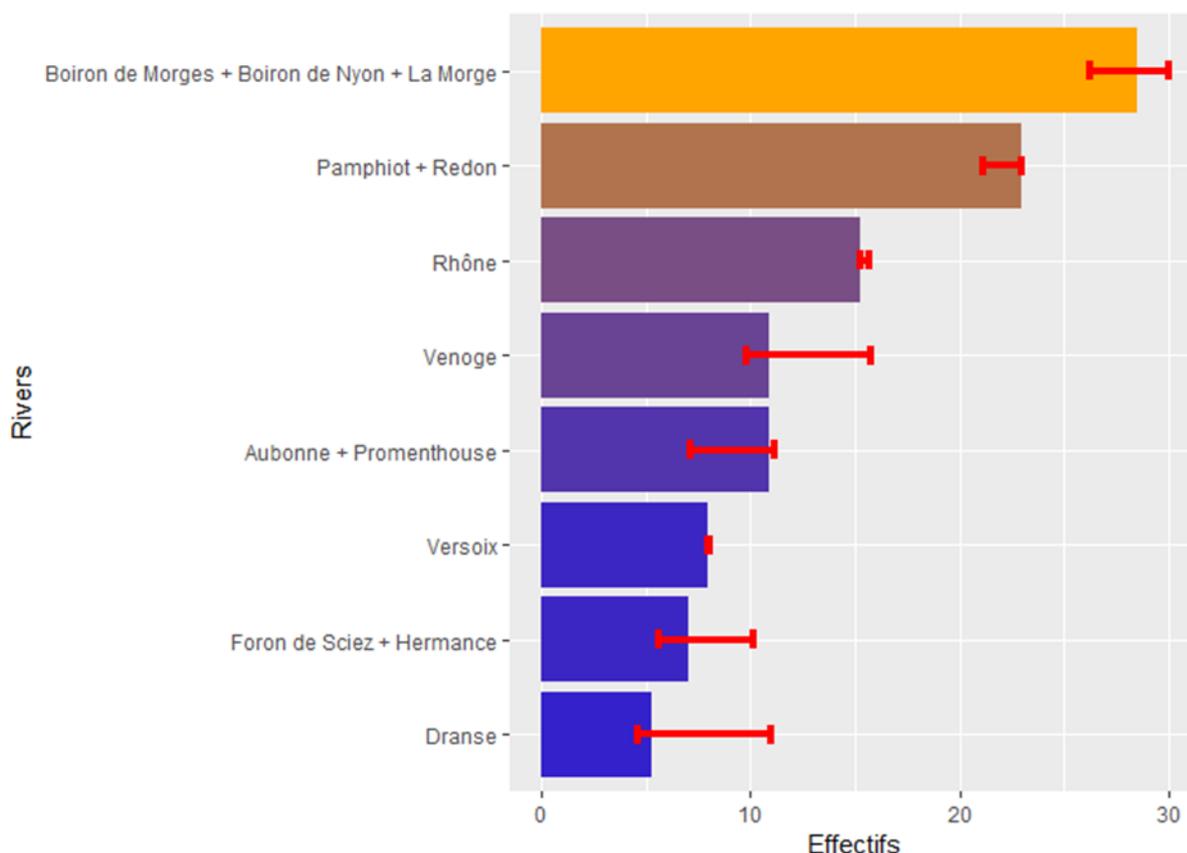


Figure 3.20 : Nombre (SD) d'individus adultes attribués à chaque groupe, cas de 8 groupes.

3.4.3 - Comparaison des résultats des deux modèles :

La comparaison des contributions (%) des adultes assignés à une origine natale via les deux modèles 8 et 6 groupes est présentée sur le tableau 3.1.

Les contributions des groupes « Dranse + Rhône » et « Foron de Sciez + Hermance + Venoge » semblent sous-estimées de 5% et 6% respectivement via le modèle 8 groupes en raison probablement des moins bonnes justesses observées en particuliers sur la Dranse (75%) et la Venoge (78%) et dans une moindre mesure sur le groupe « Foron de Sciez + Hermance » (88%), contre généralement >95% pour les autres groupes. A l'inverse, les contributions des groupes « Pamphiot + Redon » et « Boiron de Morges + Boiron de Nyon + La Morge » apparaissent surestimées de 4% et 6% respectivement via le modèle 8 groupes en raison probablement des moins bonnes précisions observées au niveau de ces deux groupes, 74% et 80% respectivement contre 86-100% pour les autres groupes. Enfin, les contributions des groupes « Aubonne + Promenthouse » et Versoix changent généralement peu quel que soit le modèle utilisé.

Tableau 3.1 : Comparaisons des contributions des 6 origines natales sources obtenues via les modèles 6 et 8 groupes. Moyenne, min et max (%)

	Contribution (%)		Contribution (%)	
	6 groupes		8 groupes	
	Moyenne	Min-Max	Moyenne	Min-Max
Dranse + Rhône	24,47	23,41-26,95	18,83	15,91-27,33
Foron de Sciez + Hermance + Venoge	22,95	20,07-25,58	16,48	12,35-26,50
Boiron de Morges + Boiron de Nyon + La Morge	21,91	20,16-26,10	26,21	21,02-30,75
Pamphiot + Redon	14,95	13,07-15,99	21,13	16,95-23,55
Aubonne + Promenthouse	9,07	6,55-9,88	10,02	5,70-11,40
Versoix	6,64	6,34-7,11	7,33	6,37-8,20

3.4.4 - Contributions des 8 origines natales sources en fonction des secteurs de capture :

Les truites lacustres étudiées ont été collectées au niveau de 5 secteurs géographiques de capture définis au niveau du Léman (Fig. 3.21). Nous avons estimé les contributions des 8 origines natales sources (8 groupes définis précédemment) au niveau des 3 secteurs 2, 3 et 4 qui présentaient des effectifs suffisant, n=40 pour le secteur de capture 2, n=31 pour le secteur de capture 3 et n=35 pour

le secteur de capture 4. Les secteurs 1 et 5 avec des effectifs de 6 et 2 individus respectivement n'ont pas fait l'objet d'une telle évaluation.

Les différents affluents frères étudiés se déversent au niveau des secteurs de capture comme suit : Hermance, Versoix et Boiron de Nyon : secteur 1 ; Promenthouse, Aubonne, Boiron de Morges, La Morge, Venoge : secteur 2 ; Rhône : secteur 3 ; Foron de Sciez, Redon, Pamphiot, Dranse : secteur 4 ; aucun affluent pour le secteur 5. Il est à noter toutefois que parmi les 8 groupes origines natales, 2 origines combinent des affluents se déversant dans deux secteurs de capture, Hermance (1) avec Foron de Sciez (4) d'une part et Boiron de Nyon (1) avec Boiron de Morges + La Morge (2) d'autre part.

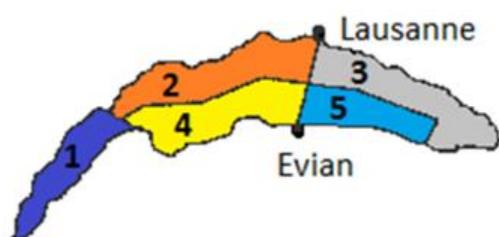


Figure 3.21 : localisation des 5 secteurs de capture dans le Léman.

La proportion des 8 origines natales dans les secteurs de capture 2, 3 et 4 est présentée sur les figures 3.22, 3.23 et 3.24.

La contribution du groupe origine « Aubonne+Promenthouse » varie de 6% à 13% selon les secteurs de capture (6% : secteur 3 ; 9% : secteur 4 ; 13% : secteur 2), la plus grande contribution étant retrouvée dans le secteur 2 où se déversent ces deux affluents.

La proportion d'individus originaires du groupe « Boiron de Morge + Boiron de Nyon + Morge » varie elle aussi selon les secteurs de captures, mais dans des proportions faibles (7%), entre 23% dans le secteur 4 et 30% dans le secteur 2. Des proportions similaires sont trouvées dans le secteur où se déversent deux de ses affluents (Boiron de Morge et Morge : secteur 2, 30%) et le secteur plus à l'ouest (secteur 3 : 29%).

La contribution de la Dranse est plus importante dans le secteur de capture dans lequel elle se déverse (secteur 4, 11%) que dans les secteurs 2 (3%) et le secteur 3 (6%).

Pour deux autres affluents se déversant dans le secteur 4, « Pamphiot + Redon », leur contribution varie de 15% à 29%. A l'inverse de la Dranse, la proportion la plus importante de ce groupe n'est pas dans le secteur de capture dans lequel ces affluents se déversent (secteur 4 : 20%) mais dans le secteur de capture 3 situé à l'Est (29%). La contribution la plus faible est quant à elle trouvée dans le secteur au Nord (secteur 2).

La proportion d'individus originaires du groupe « Hermance + Foron de Sciez » varie de 3% à 8%. Elle est la plus importante au niveau du secteur de capture 2 alors que les deux affluents de ce groupe se déversent dans le secteur 4 pour le Foron de Sciez et le secteur 1 pour Hermance.

Bien que le Versoix se déverse en secteur 1, sa aux trois secteurs est très variable, 5% pour le secteur 2, 13% pour le secteur 3 et 0% pour le secteur 4. La contribution la plus importante (secteur 3 : 13%) est assez éloigné de là où se trouve cet affluent.

Enfin, la proportion d'individus originaires du Rhône est également assez variable, 18% dans le secteur 2, 3% dans le secteur 3 et 11% dans le secteur 4. C'est d'ailleurs dans le secteur de capture abritant le Rhône que la contribution du Rhône est la plus faible.

Ces résultats confirment que les truites lacustres analysées ne sont pas restées à proximité de leurs affluents d'origine, quelle que soit la rive considérée, et ont fait preuve d'une certaine mobilité Nord/Sud et Est/Ouest. En outre, à cette échelle spatiale, la répartition des origines natales ne varie pas significativement en fonction du secteur de capture (Test exact de fisher, $p=0.32$). Ce résultat conforte la représentativité de l'échantillons analysé, puisque l'assignation n'est pas directement liée au lieu de capture.

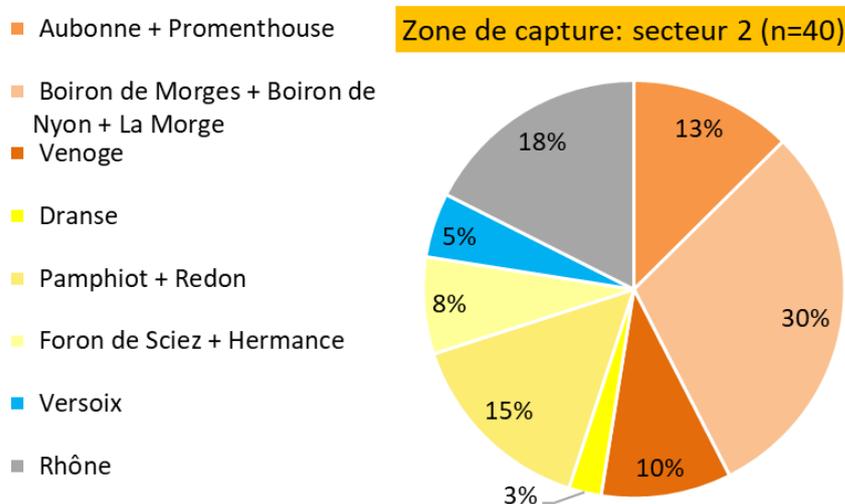


Figure 3.22 : Proportion des différentes origines natales dans le secteur de capture 2.

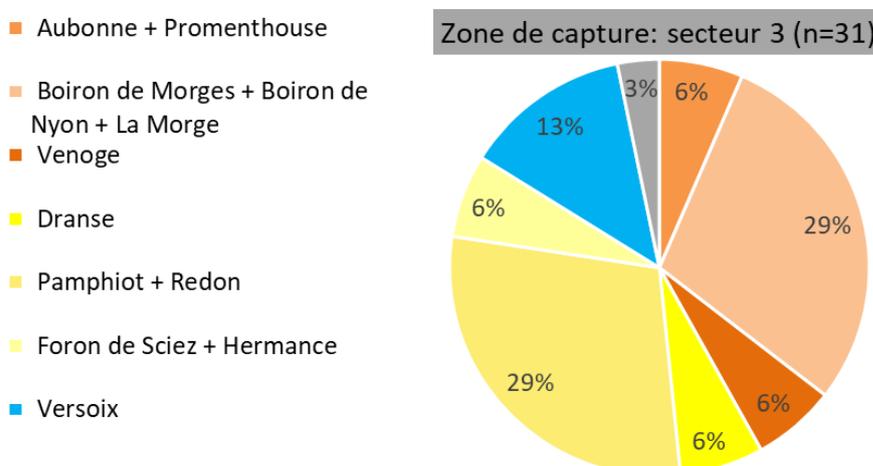


Figure 3.23 : Proportion des différentes origines natales dans le secteur de capture 3.

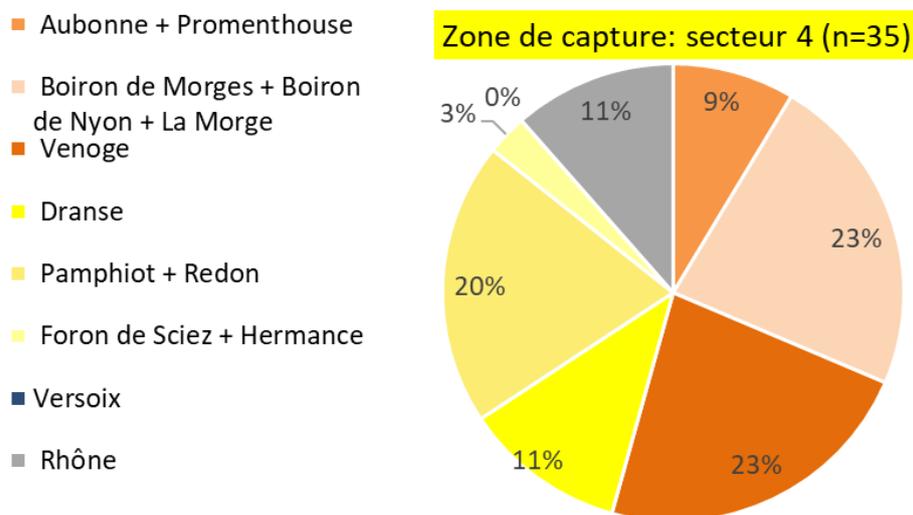


Figure 3.24 : Proportion des différentes origines natales dans le secteur de capture 4.

4 - Discussion

Evaluation du potentiel de la microchimie des otolithes comme outil de discrimination de l'origine de la truite fario lacustre de grands lacs alpins (Léman, Annecy, Bourget, Sautet)

Un des objectifs de ce projet était de valider le potentiel de la microchimie des otolithes comme outil de discrimination de l'origine natale de la truite fario du lac Léman et de l'étendre à trois autres lacs alpins (Annecy, Bourget, Sautet).

Les premiers tests réalisés en 2015 sur le Léman étaient particulièrement encourageants (Caudron et al., 2015), mais ne prenaient pas en compte la variabilité interannuelle.

Sur la base de deux cohortes successives, 2015 et 2016, une première étape a permis de définir quels paramètres microchimiques et combien étaient souhaitables pour obtenir la meilleure discrimination possible, 6 paramètres ont pu ainsi être sélectionnés, Sr:Ca, Ba:Ca, Sr:Ba, $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr , Mg:Ca et Mn:Ca. Ces 6 paramètres ont été utilisés par la suite sur l'ensemble des lacs étudiés pour tester le potentiel d'assignation à une origine natale.

Une deuxième étape a conduit à l'évaluation du potentiel de discrimination par une approche statistique de type analyse discriminante avec *Random Forest*. Les résultats de cette étape mettent en évidence une variabilité interannuelle au niveau de quelques affluents du Léman, variabilité qui induit des difficultés dans la différenciation de tous les affluents les uns des autres.

Dans un souci de maximiser le nombre d'origines natales sources (nombre d'affluents ou groupes d'affluents discriminés) et d'optimiser la justesse et la précision des attributions tout en prenant en compte la variabilité temporelle, l'étape suivante a été d'approfondir deux cas de regroupements, 8

et 6 sources natales au niveau du Léman. Dans le cas du lac d'Annecy, le cas de 6 regroupements comme origines sources natales a été examiné, en particulier car il permet de discriminer le Laudon du ruisseau de la Planche, ce dernier ruisseau étant identifié comme présentant un bon recrutement naturel (Chasseriau et Caudron, 2011). Pour les deux autres lacs, Bourget et Sautet, un seul cas a pu être testé en raison la présence de seulement deux affluents frères au niveau de ces lacs.

Pour chacun des lacs, un modèle d'assignation a été validé sur la base des performances suivantes : taux d'assignations correctes $\geq 90\%$ permettant d'attribuer une origine unique à un maximum de poissons avec une précision en général $>78\%$ mais bien souvent $>90\%$ pour une large majorité des origines sources. Les modèles 8, 6, 2 et 2 origines natales sources ont été ainsi retenus pour les lacs Léman, Annecy, Bourget et Sautet, respectivement.

Pour le Léman et Annecy, les modèles développés permettent de déterminer des origines natales sources qui présentent une assez bonne cohérence géographique avec une bonne séparation des principaux affluents d'intérêts pour les gestionnaires. Dans le cas des deux autres lacs (Bourget et Sautet) qui présentaient seulement deux affluents principaux, là aussi l'outil microchimie s'avère pertinent dans la mesure où il permet de discriminer systématiquement les deux affluents de chaque lac avec une justesse et une précision très élevées ($>95\%$).

Au bilan, cette étude confirme l'utilité de la microchimie des otolithes pour aborder des questions d'intérêt pour les acteurs en charge des suivis des populations de migrateurs lacustres dans les grands lacs alpins, en particuliers pour l'évaluation des contributions respectives des différentes zones de recrutement naturelles au stock lacustre.

Evaluation de l'origine natale de truite fario lacustre adulte du Léman

Le deuxième objectif de ce projet était d'appliquer le modèle d'assignation de l'origine natale ainsi développé à des truites lacustres adultes de la cohorte 2008 collectées dans le lac Léman. Sur 165 poissons pêchés dans le lac, $>70\%$ ont pu être assignés à une source unique et 25% environ à une double origine sur la base du modèle d'assignation à 8 groupes d'origines natales.

Les 8 origines natales sources contribuent au stock de truites lacustres mais avec des proportions variées : par ordre d'importance, « Boiron de Morge + Boiron de Nyon + La Morge » (26%), « Pamphiot + Redon » (21%), Rhône (14%), Venoge (10%), « Aubonne + Promenthouse » (10%), Versoix (7%), « Foron de Sciez + Hermance » (6%) et Dranse (5%). Ces résultats mettent en lumière la **contribution majeure des petits affluents lémaniques dans le stock de truite lacustre**. Inversement, **les deux plus gros affluents (Rhône, Dranse) ne contribuent qu'à hauteur de 19 à 25% du stock** (selon si l'on considère 6 ou 8 groupes). Ce résultat vient confirmer l'hypothèse d'une faible contribution du Rhône, qui présente peu de zones de fraie potentielles pour la truite lacustre en aval du barrage de Lavey. La Dranse, deuxième plus gros affluent après le Rhône, est une rivière très prisée pour la pêche de truites lacustres, certaines y séjournant toute l'année. Soumise aux éclusées de l'usine de Bioge, son débit réservé a été rehaussé dès 2005, sans gain biologique notable entre 2007 et 2009 (SAGE, 2010), les augmentations de remontées de truites lacustres et des densités de 0+ n'ayant été constatées qu'à partir de 2010 (de 400 truites 0+ / ha en 2008 à plus de 1'000 / ha dès 2010 à l'amont de Vongy; d'après Chasseriau, 2013). Il est donc possible que la même étude réalisée après 2010 puisse montrer une

contribution plus importante de truites issues de la Dranse ; cette hypothèse serait à valider par des analyses complémentaires.

La discrimination plus précise des affluents n'est pas possible par le biais de la microchimie, l'erreur d'assignation serait alors trop importante pour pouvoir comparer les contributions pour chaque affluent. **Des hypothèses sur les contributions au sein d'un groupe peuvent toutefois être avancées en fonction des données piscicoles disponibles** (pêches d'inventaires, observations ponctuelles) et des linéaires colonisables par la truite lacustre. Ainsi, au sein du groupe constitué du Boiron de Morge, de la Morge et du Boiron de Nyon, l'hypothèse d'une contribution majoritaire du Boiron de Morge peut être avancée. En effet, le cours d'eau est accessible par la truite lacustre sur un linéaire de 3.8 km, et présente un potentiel jugé « important » pour la reproduction naturelle sur ce secteur (données Direction Générale de l'Environnement). En outre, les densités de 0+ estimées à l'échelle du cours d'eau en juillet 2008 par pêches d'inventaires étaient d'environ 3'000 ind/ha (Rubin et Rubin, 2016). A l'inverse, les données disponibles sur le Boiron de Nyon indiquent un potentiel « moyen » pour la reproduction naturelle des truites lacustres (données Direction Générale de l'Environnement). De faibles surfaces de frayères ont été observées sur un linéaire accessible limité à 2 km ; des crues fréquentes et des colmatages réguliers ont été mentionnés comme facteurs limitants (S. Rojard, comm. Pers.). Sur la Morges, le linéaire accessible par la truite lacustre est seulement d'1 km, le potentiel pour la fraie est jugé « faible », mais la reproduction naturelle est tout de même avérée, comme l'indiquent des données de pêches ponctuelles (S., Rojard, comm. Pers.).

Le groupe « Aubonne-Promenthouse » présente une faible contribution au stock de truites de la cohorte 2008 (<10%) alors que les deux rivières sont caractérisées par une qualité de reproduction naturelle « importante » pour la Promenthouse et « très importante » pour l'Aubonne (données Direction Générale de l'Environnement). Ce résultat apparaît surprenant, d'autant que des remontées importantes de géniteurs ont régulièrement été observées sur ces deux cours d'eau, notamment au niveau de la chambre de capture de l'Aubonne, utilisée pour la capture des géniteurs prélevés pour l'alevinage. Le succès de la reproduction naturelle pourrait être en cause, en particulier dans le cas de l'Aubonne qui est soumise aux éclusées sur 3 km avant de rejoindre le Léman (DGE, 2014).

Concernant le groupe « Foron de Sciez-Hermance », les données piscicoles sur le Foron de Sciez indiquent une très bonne fonctionnalité de la reproduction naturelle sur cette rivière, accessible aux truites lacustres sur un linéaire de 4 km environ. En juillet 2011 et 2012, les densités moyennes sur le secteur colonisable étaient d'environ 8'000 alevins / ha (Vatland et Caudron, 2015). Inversement, l'Hermance présente un potentiel très limité, des populations de truites très déstructurées (FDPPMA74, 2016) avec peu de frayères observées, et des conditions de débits estivaux fortement limitantes (étiages sévères sur tout le linéaire et assècs sur les secteurs amont).

Le groupe « Redon-Pamphiot » est constitué de deux cours d'eau proches spatialement. Les populations de truite du Redon ont fait l'objet de nombreuses études depuis la fin des années 80, la reproduction naturelle étant très importante sur ce cours d'eau (13'000 alevins / ha en moyenne en 2011-12) sur environ 2.5 km de cours d'eau colonisable (Vatland et Caudron, 2015). Le Pamphiot se caractérise par des populations de truites assez dégradées, avec des densités et biomasses assez faibles sur les 3.5 km colonisables par la truite lacustre (FDPPMA74, 2016). Toutefois, lors des pêches de juvéniles réalisées dans le cadre de la présente étude, les densités de juvéniles observées n'étaient pas négligeables.

La distribution des différentes origines natales a également été examinée en fonction du secteur de capture au sein du lac. Le couplage des origines natales et des lieux de captures fait apparaître qu'une

assez large part des individus ne provient pas des affluents correspondant au secteur de capture. Par exemple, environ 49% des poissons capturés dans le secteur 2 seraient originaires d'affluents des autres secteurs, 57% pour le secteur 3 et même 66% pour le secteur 4. Ces résultats préliminaires soulignent **l'absence d'une cohérence géographique entre le lieu de capture et le lieu de naissance**. Cela permet de valider l'échantillon de truites adultes analysé, en montrant qu'il provient bien de l'ensemble du lac. Bien qu'une zone du lac ait été sur-échantillonnée, cela n'a pas d'incidence sur la représentation des origines natales. En outre, ces résultats indiquent une mobilité de la truite lacustre dans le lac et dans une certaine mesure, que le stock se mélange dans le lac.

Les résultats montrent que le modèle discriminant validé sur les juvéniles d'origine connue peut être utilisé de manière robuste sur des otolithes de poissons adultes afin d'évaluer la contribution de différentes origines natales. La mise au point de ces analyses apporte des résultats inédits aux gestionnaires de la pêche et des milieux sur le Léman qui connaissent aujourd'hui la part respective de 8 zones de recrutement naturel dans les captures des pêcheurs. Ces informations peuvent être utilisées pour hiérarchiser et mettre en place des actions de conservation et de restauration de ces zones en fonction de leurs contributions.

Enfin, la démarche et la méthode testée sur le Léman peut désormais être transposée sur d'autres lacs présentant des problématiques similaires, à condition de vérifier au préalable que des discriminations au stade juvénile ont été observées.

Références

- Amano Y., Kuwahara M., Takahashi T., Shirai K., Yamane K., Amakawa H., Otake T., 2013. Otolith elemental and sr isotopic composition as a natal tag for Biwa salmon *Oncorhynchus masou* subsp. in lake Biwa, Japan. *Aquatic Biology*, 19: 85-95.
- Barnett-Johnson, R., Pearson, T. E., Ramos, F. C., Grimes, C. B. & Bruce MacFarlane, R. 2008. Tracking natal origins of salmon using isotopes, otoliths, and landscape geology. *Limnology and Oceanography* 53: 1633-1642.
- Breiman L. 2001. Random forests. *Machine Learning* 45: 5-32.
- Caudron A. & Champigneulle A., 2006. Technique de fluoromarquage en masse à grande échelle des otolithes d'alevins vésiculés de truite commune (*Salmo trutta* L.) à l'aide de l'Alizarine red S. *Cybiurn* 30(1): 65-72.
- Caudron A. and Champigneulle A. 2009. Multiple marking of otoliths of brown trout, *Salmo trutta* L., with alizarin redS to compare efficiency of stocking of three early life stages. *Fisheries Management and Ecology* 16: 219-224.
- Caudron A., Lannes-Lacrouts E., Bareille G., Dorioz J.M., A. Richard A., Vignon M. 2015. Est-ce que la composition géochimique des otolithes permet de déterminer l'origine natale des truites fario du Léman ? Rapport d'étude de faisabilité. 20 pages.
- Champigneulle A., Buttiker B. & Melhaoui M., 1999. Main characteristics of the biology of the trout (*Salmo trutta*) in Lake Lemman (Lake Geneva) and some of its tributaries. In "Biology and ecology of the brown trout and sea trout". Baglinière J.L. & Maisse G. (Eds). Springer Published in association with Praxis Publishing, Chichester, U.K., pp. 147-174.
- Champigneulle A. & Caudron A., 2013. Projet franco-suisse « Truite-Ombles-Corégone au Léman ». rapport final, 110p.
- Charollais J., Weidmann M., Berger J.P., Engesser B., Hotellier J.F., Gorin G., Reichenbacher B. & Schäfer P., 2007. La molasse du bassin franco-genevois et son substratum. *Archives des Sciences* 60 : 59-174.
- Chasseriau C. & Caudron A.. 2011. Etude des populations de truites sédentaires et migrantes sur le bassin du lac d'Annecy et évaluation des pratiques de gestion. Volet 1 : Etat des populations sur les affluents. Rapport de la Fédération de Haute Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique. 53p. + annexes.
- Cutler D.R., Edwards T.C., Jr., Beard K.H., Cutler A., Hess K.T., Gibson J. and Lawler J.J. 2007. Random forests for classification in ecology. *Ecology* 88: 2783-2792.
- Elsdon, T. S. & Gillanders, B. M. 2004. Fish otolith chemistry influenced by exposure to multiple environmental variables. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 313: 269-284.
- Fablet R., Daverat F. and De Pontual H. 2007. Unsupervised Bayesian reconstruction of individual life histories from otolith signatures: case study of Sr:Ca transects of eel (*Anguilla anguilla*) otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64: 152-165.
- Keith P., Persat H., Feunteun E. & Allardi J. (coords). 2011. Les poissons d'eau douce de France. Biotope, Mèze ; Museum national d'histoire naturelle, Paris, 552p.

- Kennedy, B. P., Chamberlain, C. P., Blum, J. D., Nislow, K. H. & Folt, C. L. 2005. Comparing naturally occurring stable isotopes of nitrogen, carbon, and strontium as markers for the rearing locations of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62: 48-57.
- Lannes-Lacrouts, E. 2015. Origine natale des truites lacustres (*Salmo trutta lacustris*) du lac Léman : utilisation de la microchimie des otolithes. Rapport de Master 2 : écologie, éthologie de l'Université de St-Etienne. 29 pages + annexes.
- Martin J., 2013. Développement de la microchimie élémentaire (Sr, Ba) et isotopique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des otolithes et des écailles de salmonidés des gaves pyrénéens: évaluation du potentiel pour un appui à la gestion piscicole. Thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) – soutenue le 25 janvier 2013.
- Martin J., G. Bareille, S. Berail, F. Daverat, C. Pécheyran, N. Bru, H. Tabouret, O.F.X. Donard, 2013. Spatial and temporal variations in otolith chemistry and relationships with water chemistry: a useful tool to distinguish Atlantic salmon parr from different natal streams. *Journal of Fish Biology* 82: 1556–1581.
- Martin J., G. Bareille, S. Berail, F. Daverat, C. Pécheyran, N. Bru, E. Beall, F. Gueraud, F. Lange, D. Barracou, O.F.X. Donard, 2013. Persistence of a southern Atlantic salmon population: diversity in natal origins from otolith elemental and Sr isotopic signatures. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70: 1-16.
- Mercier L., Darnaude A.M., Bruguier O., Vasconcelos R.P., Cabral H.N., Costa M.J., Lara M., Jones D.L. and Mouillot D. 2011. Selecting statistical models and variable combinations for optimal classification using otolith microchemistry. *Ecological Applications* 21: 1352-1364.
- Munro, A. R., McMahan, T. E. & Ruzycski, J. R. 2005. Natural chemical markers identify source and date of introduction of an exotic species: Lake trout (*Salvelinus namaycush*) in Yellowstone Lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62: 79-87.
- Ombredane, D., & Baglinière, J. L. (1992). Les écailles et leurs utilisations en écologie halieutique. In *Tissus durs et âge individuel des vertébrés. Colloque national, Bondy. Colloques et Séminaires ORSTOM-INRA, Paris.* p (pp. 151-192).
- Teichert N., Tabouret H., Lagarde R., Grondin H., Ponton D., Pécheyran C. and Bareille G. 2018. Site fidelity and movements of an amphidromous goby revealed by otolith multi-elemental signatures along a tropical watershed. *Ecology of Freshwater Fish* 27 (3) : 834-846.
- Wells, B. K., Rieman, B. E., Clayton, J. L., Horan, D. L. & Jones, C. M. 2003. Relationships between water, otolith, and scale chemistries of westslope cutthroat trout from the Coeur d'Alene River, Idaho: The potential application of hard-part chemistry to describe movements in freshwater. *Transactions of the American Fisheries Society* 132: 409-424.
- Whitledge G., 2009. Otolith microchemistry and isotopic composition as potential indicators of fish movement between Illinois river drainage and lake Michigan. *Journal of Great lakes* 35: 101-106.
- Zimmerman C. E., Swanson H. K., Volk E. C. and Kent A. J.R., 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: 1370-1380.

Zitek, A., Irrgeher, J., Kletzl, M., Weismann, T., & Prohaska, T. (2013). Transgenerational marking of brown trout *Salmo trutta* ff, using an ^{84}Sr spike. *Fisheries Management and Ecology*, 20(4), 354-361.

Annexe 1: Liste des stations échantillonnées en 2015 et 2016 (eau + juvéniles)

Rivière	N° station	Site	Eau		Juvéniles (prélevés / analysés)		GPS (WGS 84)				
			mars-15	juil-16	sept-16	mars-15	sept-16	Coord. N	Coord. E		
Versoix	LE03a	chem. de la Papéterie, secteur renaturé	X	X	X	2	1	4	4	46.276862	6.161634
Versoix	LE03b	route de La Bâtie, pisciculture Richelien				2	2	3	3	46.280988	6.135350
Versoix	LE03c	Douane de Sauvigny			X	1	1	3	3	46.311887	6.120205
Hermance	LE04a	Pont de Crévy	X	X		2	1	4	4	46.283356	6.240910
Hermance	LE04b	Stade de Chevrin, en-dessous du chalet				2	2	2	2	46.289838	6.251990
Hermance	LE04c	Chens le Pont/Hermance, borne frontière 217, "pont de pierre"			X	1	1	4	3	46.300691	6.247533
Boiron de Nyon	LE05a	Aval voie CFF	X	X	X	2	1	4	4	46.377814	6.229417
Boiron de Nyon	LE05b	Eysin, route de Grans				3	3	4	4	46.376534	6.207685
Promenthouse	LE06a	Villa Napoléon				4	4	-	-	46.394905	6.271500
Promenthouse	LE06b	Amont route suisse, usine électrique	X	X	X	2	2	6	5	46.406302	6.267938
Promenthouse	LE06c	Amont voie CFF				-	-	4	4	46.412103	6.260022
Aubonne	LE07a	Amont seuil chambre de capture	X	X	X	0	0	4	4	46.470945	6.405758
Aubonne	LE07b	Amont STEP Aubonne				2	2	3	2	46.482546	6.403488
Aubonne	LE07c	Pont d'Aubonne - route Neuve				3	3	3	3	46.499407	6.390422
Boiron de Morges	LE08a	Aval de la STEP de Lully				1	1	2	2	46.497054	6.468993
Boiron de Morges	LE08b	Amont de la STEP de Lully	X	X	X	2	2	3	2	46.498956	6.466999
Boiron de Morges	LE08c	Moulin de Lussy				2	2	4	4	46.498809	6.437156
Morges	LE09a	Amont chute infranchissable (Patinoire)	X	X	X	5	2	3	2	46.512717	6.487830
Morges	LE09b	Aval chute infranchissable				-	-	6	6	46.512271	6.488540
Venoge	LE10a	Saint Sulpice /amont Route suisse	X	X	X	2	2	4	2	46.514974	6.544425
Venoge	LE10b	Moulin du Choc				3	3	5	4	46.561877	6.528798
Venoge	LE10c	stade Penthaz				2	2	3	3	46.599714	6.527992
Rhône	LE13a	aval canal de Finges (en 2015: station amont canal)	X			4	4	6	6	46.304054	7.580579
Rhône	LE13b	Lavey-les-Bains	X	X	X	-	-	-	-	46.217718	7.008406
Rhône	LE13c	Amont canal Russen				-	-	5	2	46.303123	7.573656
Foron de Sciez	LE16a	Amont Pont RN5	X	X	X	3	3	4	4	46.329817	6.382123
Foron de Sciez	LE16b	Moulin Gorjux				2	2	4	3	46.321063	6.385794
Redon	LE17a	Amont camping-village Redon				3	3	4	4	46.347762	6.403795
Redon	LE17b	Carrière	X	X	X	3	2	4	4	46.340768	6.411296
Pamphiot	LE18a	Aval route Bons D903				2	2	5	5	46.347069	6.459811
Pamphiot	LE18b	Amont pont route Thonon	X	X	X	3	3	4	4	46.354924	6.447914
Dranse	LE19a	Amont passerelle, accès rafting (usine d'Armoy)	X	X	X	3	3	5	4	46.355649	6.525986
Dranse	LE19b	Lesvaux				2	2	4	2	46.344652	6.547885
			14	13	15	61	61	108	108		

Annexe 2: Résultats des mesures physico-chimiques réalisées lors des prélèvements d'eau sur les affluents du Léman

Rivière	N° station	Campagne mars 2015						Campagne septembre 2016			
		Date	T°C	pH	Cond (µs/cm)	O2 (mg/L)	O2 (%)	Date	Cond (µs/cm)	T°C	pH
Versoix	LE03a	11/03/2015	8.70	8.42	425	12.22	107.9	23/09/2016	389	11.8	7.9
	LE03c	-	-	-	-	-	-	23/09/2016	385	10.9	7.72
Hermance	LE04a	11/03/2015	8.50	8.40	581	16.15	144.1	-	-	-	-
	LE04c	-	-	-	-	-	-	23/09/2016	573	14.4	7.82
Boiron de Nyon	LE05a	11/03/2015	8.30	8.42	511	12.96	113.6	30/09/2016	461	13.3	7.34
Promenthouse	LE06b	11/03/2015	8.60	8.26	475	11.79	104.4	30/09/2016	478	12.8	7.42
Aubonne	LE07a	11/03/2015	7.50	8.45	403	12.2	105.7	30/09/2016	533	12.3	7.63
Boiron de Morges	LE08b	11/03/2015	7.50	8.37	582	12.86	111.7	30/09/2016	511	14.1	7.62
Morges	LE09a	11/03/2015	7.30	8.42	614	12.69	109.2	30/09/2016	639	13.9	8.02
Venoge	LE10a	11/03/2015	8.30	8.35	576	11.5	10.17	30/09/2016	641	16	7.55
Rhône	LE13a	10/03/2015	6.30	8.12	492	12.05	102.6	-	-	-	-
	LE13b	10/03/2015	9.50	8.62	448	15.31	139.3	12/10/2016	355	8.4	6.8
Rhône	LE13c	-	-	-	-	-	-	12/10/2016	403	7.1	6.58
Foron de Sciez	LE16a	11/03/2015	8.30	8.63	513	12.46	109	28/09/2016	537	13.7	8.02
Redon	LE17b	11/03/2015	8.80	8.41	628	11.87	106.2	28/09/2016	650	14.1	7.48
Pamphiot	LE18b	11/03/2015	8.90	8.45	633	11.82	106.1	28/09/2016	661	12.7	7.41
Dranse	LE19a	11/03/2015	6.80	8.37	475	12.1	103.6	28/09/2016	824	11.6	7.59