



HAL
open science

Etude de l'origine natale des truites du lac du Bourget par la microchimie des otolithes Rapport final

Alexandre Richard, Gilles Bareille, Matthias Vignon

► To cite this version:

Alexandre Richard, Gilles Bareille, Matthias Vignon. Etude de l'origine natale des truites du lac du Bourget par la microchimie des otolithes Rapport final. Université de Pau et des Pays de l'Adour, UMR 5254 IPREM CNRS/UPPA; Scimabio Interface; Université de Pau et des Pays de l'Adour, UMR 1224 EcoBioP INRAE/UPPA. 2024. <hal-04923548>

HAL Id: hal-04923548

<https://univ-pau.hal.science/hal-04923548v1>

Submitted on 31 Jan 2025

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.



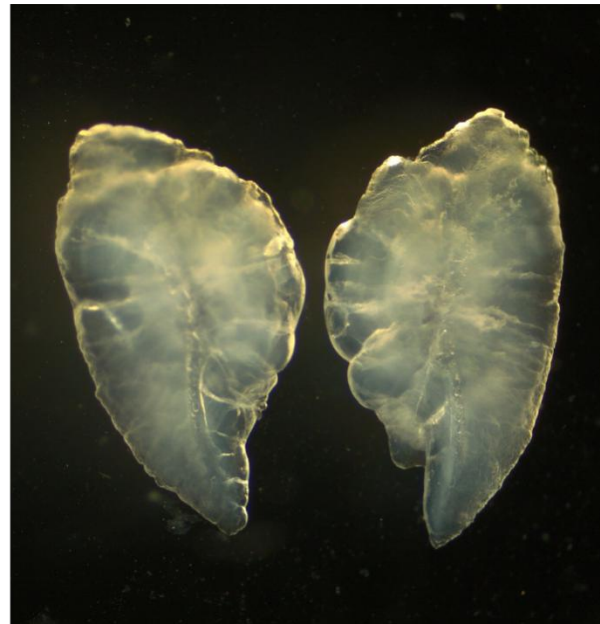
HAL Authorization



Etude de l'origine natale des truites du lac du Bourget par la microchimie des otolithes

Rapport final

Fédération de Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique



Décembre 2024



En collaboration avec :



Citation : RICHARD A., BAREILLE G., VIGNON M. 2024. Etude de l'origine natale des truites du lac du Bourget par la microchimie des otolithes. Rapport final. 20 p.

SOMMAIRE

1	Contexte	4
2	Objectifs	5
3	Prélèvements et analyses.....	5
3.1	Sites d'échantillonnage et effectifs analysés	5
3.2	Préparation des otolithes.....	8
3.3	Analyses chimiques	9
3.4	Analyses statistiques	10
4	RESULTATS - INTERPRETATIONS.....	12
4.1	Analyses chimiques des otolithes de truites juvéniles.....	12
4.1.1	Exemples de profils élémentaires	12
4.1.2	Résultats des analyses chimiques	12
4.1.3	Assignment des origines natales et des cours d'eau d'origine.....	15
4.2	Analyse chimique des otolithes de truites adultes	15
4.2.1	Exemples de profils élémentaires	15
4.2.2	Résultats des analyses chimiques	16
4.2.3	Assignment des origines natales (reproduction naturelle vs repeuplement) et des cours d'eau d'origine.....	17
5	Discussion.....	19
6	Références.....	20

Liste des figures

Figure 1 : Evolution des captures de truites au lac du Bourget de 1921 à 2015 (Source : DDT, CISALB, 2016 ; Proner et al., 2022).....	4
Figure 2 : Répartition par cohorte de l'effectif de truites adultes analysées, avec distinction des individus marqués à l'alizarine	6
Figure 3 : otolithes de juvéniles de truites photographiés dans l'éthanol sous loupe binoculaire (grossissement x40), à gauche : otolithes normaux, à droite : l'un des otolithes (partie transparente, otolithe de gauche) est vatéritique.	8
Figure 4: Exemples de profils de 5 otolithes de truites juvéniles du Sierroz montrant les 2 parties des otolithes retenues. Les profils du haut représentent le ratio Sr/Ca et les profils du bas le ratio Ba/Ca. Ces truites représentent d'autre part des individus issus de la pisciculture, qui est caractérisée par de fortes valeurs en Sr/Ca (zone centrale) par rapport au Sierroz (zone juvénile).....	10
Figure 5 : Profils des otolithes de truites prélevées sur le Sierroz (station abattoirs) et la Leysse (station Camiva). Les ratios élémentaires Ba/Ca et Sr/Ca sont présentés pour tous les otolithes analysés sur ces 2 stations en 2021.	12
Figure 6 : Ratios élémentaires moyens mesurés dans la zone juvénile et dans la zone maternelle (pour les individus d'origines 'pisciculture') des otolithes des 40 truites juvéniles analysées.	13
Figure 7 : Exemple de profils élémentaires dans un otolithe de truite adulte. La zone maternelle est généralement caractérisée par un pic de manganèse Mn/Ca. Le passage au lac s'observe par le changement de signature Sr/Ca.	15
Figure 8: Représentation des signatures chimiques moyennes des truites adultes (Sr/Ca et Sr/Ba), dans la zone « centrale » (= maternelle) de l'otolithe. Les signatures des juvéniles issus de reproduction naturelle ou de pisciculture sont projetées dans le même plan.....	16
Figure 9 : Représentation des signatures chimiques moyennes des truites adultes (Sr/Ca et Sr/Ba), dans la zone « juvénile » de l'otolithe. Les signatures des 3 origines de juvéniles sont projetées dans le même plan.....	16
Figure 10 : Diagramme de Sankey représentant la répartition des truites adultes en fonction de leur origine natale (d'après les marquages ARS) puis de leur cours d'eau d'origine (ou de croissance) d'après la chimie des otolithes.....	19

Liste des tableaux

Tableau 1 : Echantillonnage des truitelles en 2021	5
Tableau 2 : Effectifs analysés par station et par année.....	6
Tableau 3: Truites adultes analysées par chimie des otolithes.....	7
Tableau 4 : Valeurs moyennes des différents ratios élémentaires dans la zone « juvénile » de l'otolithe des 40 juvéniles de truites analysées.	14
Tableau 5 : Résultats des assignations par Random Forest des truites adultes analysées.....	17
Tableau 6 : Résultats des assignations des truites adultes à leur rivière d'origine en fonction de leur origine natale (Marqué ARS = pisciculture ; Non marqué ARS = reproduction naturelle).....	18

1 Contexte

Les captures de truites lacustres au lac du Bourget ont connu un fort déclin à la fin des années 90, le total des captures par les pêcheurs professionnels étant passé d'une moyenne de 2.5 t sur la période 1980-1990 à moins de 500 kg depuis 1999, avec un minimum à 42 kg en 2008 (Proner *et al.*, 2022). Depuis, les captures oscillent autour de 150 kg/an, réparties entre les deux catégories de pêcheurs, amateurs et professionnels (Figure 1).

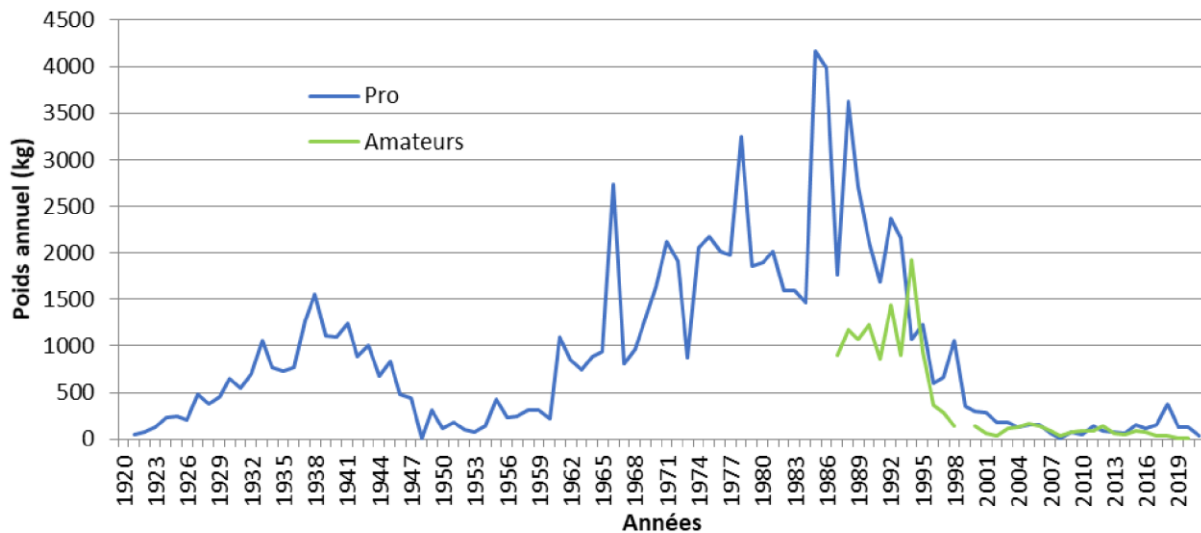


Figure 1 : Evolution des captures de truites au lac du Bourget de 1921 à 2015 (Source : DDT, CISALB, 2016 ; Proner *et al.*, 2022)

Différentes actions de renaturation ont été réalisées depuis 2002 sur les affluents du lac du Bourget, en particulier la Leysse et le Sierroz. Les travaux visaient à augmenter le gabarit hydraulique (Leysse), restaurer la continuité écologique (Leysse et Albanne, Tillet, Sierroz), recréer des zones attractives pour les populations piscicoles (Leysse, Sierroz) et améliorer la connectivité latérale (Leysse). Des recensements de frayères ont été réalisés depuis 2012, ainsi que des pêches de sondage en période de reproduction. Les résultats tendent à montrer un bénéfice des actions de restauration sur l'activité de reproduction des truites dans les deux affluents majeurs du lac (Proner *et al.*, 2022).

Les opérations de repeuplement à partir de truites juvéniles (0+, essentiellement préestivaux) déversés dans les affluents ont été réalisées dès 2004. Depuis 2010, les alevinages oscillent entre 150 et 200'000 préestivaux, avec deux années sans alevinage (2017 et 2018), en raison d'un incident à la pisciculture (Proner *et al.*, 2022). La contribution du repeuplement dans les captures a été évaluée par le biais de marquages à l'alizarine Red S des alevins vésiculés de truites destinées à l'alevinage. Une contribution moyenne de 43% a été évaluée sur la période 2010 à 2019, avec une tendance à la baisse sur la période 2015-2019 (hors 2017 et 2018).

Dans un contexte d'évolution favorable des zones de reproduction, la FDPPMA73 souhaite évaluer les contributions relatives des différents affluents du lac du Bourget au recrutement des truites lacustres. La microchimie des otolithes a été précédemment utilisée pour évaluer la contribution des principaux affluents du Léman dans le stock de truites lacustres (Richard *et al.*, 2019). Des tests préliminaires avaient alors été réalisées sur des juvéniles de truites du Sierroz et de la Leysse et avaient montré une bonne discrimination des deux origines à partir du ratio élémentaire Sr/Ca. Le présent projet vise à aller plus loin en confirmant ces résultats préliminaires sur des échantillons plus récents,

en intégrant d'autres affluents et en évaluant au sein de la population de truites adultes les parts respectives des différentes origines natales, pisciculture (= repeuplement) ou reproduction naturelle en rivière.

2 Objectifs

Les objectifs de ce projet sont les suivants :

1. **Analyser la composition chimique élémentaire des otolithes d'un échantillon de truitelles** provenant des principaux affluents du lac du Bourget, où se déroule potentiellement la reproduction des truites lacustres **et générer un modèle d'assignation de ces truitelles à leur rivière d'origine ;**
2. **Analyser cette même composition élémentaire sur un échantillon de truites lacustres adultes** provenant de captures dans le lac par les pêcheurs ;
3. **Essayer de caractériser les proportions relatives des origines natales (pisciculture, reproduction naturelle) et des cours d'eau de grossissement (affluents du lac) des truites lacustres adultes sur la base des données microchimiques disponibles.**

3 Prélèvements et analyses

3.1 Sites d'échantillonnage et effectifs analysés

Les échantillonnages de **truites juvéniles (0+)** ont été réalisés par la FDPPMA73 en septembre 2021. Un total de 41 individus de tailles comprises entre 67 et 110 mm ont été prélevés par pêches électriques au niveau des deux principaux bassins-versants : la Leysse et le Sierroz (Tableau 1). Les deux principaux affluents de la Leysse aval ont également été intégrés (Nant Varon et Hyères). Le Tillet n'a pas fait l'objet de prélèvements étant donné les températures trop élevées enregistrées pendant l'hiver, dues au rejet des thermes d'Aix-les-Bains, rendant impossible la reproduction des truites. Les deux autres tributaires (la Belle Eau et le Canal de Chautagne) ont été jugés peu attractifs pour la reproduction (Proner *et al.*, 2022).

Tableau 1 : Echantillonnage des truitelles en 2021

Bassin	Cours d'eau	Station	Date	Coordonnées Lambert 93		Altitude
				X	Y	
Leysse	Hyère	La Boisse	06.09.2021	926729	6502061	260
	Leysse (amont)	Pont des Carmes	08.09.2021	928532	6500657	275
	Leysse (aval)	Camiva	08.09.2021	925453	6503830	250
	Nant Varon	Rte de la Serraz	08.09.2021	922625	6508664	245
Sierroz	Sierroz (amont)	Abattoirs	20.09.2021	926290	6516187	250
	Sierroz (aval)	Amont pont SNCF	20.09.2021	925225	6515490	240

A partir des échantillons collectés en 2021, 30 individus ont pu être analysés (Tableau 2), dont 1 individu retiré sur le Nant Varon car finalement non exploitable. Ces 29 individus viennent compléter les 11 truitelles déjà prélevées dans le Sierroz et la Leysse et analysées en 2017 (Richard *et al.*, 2019). Ainsi, **l'effectif total analysé se monte à 40 truitelles réparties sur 4 cours d'eau** (Tableau 2).

Tableau 2 : Effectifs analysés par station et par année

Bassin	Cours d'eau	Station	Effectif 2017	Effectif 2021
Leysse	Hyères	La Boisse		4
		Amont		5
	Leysse	Aval*	6	5
		Nant Varon	Route de la Serraz	
Sierroz	Sierroz	Amont pont SNCF	5	5
		Abattoirs		6
			11	29

* 2017: Le Tremblay et ZI; 2021: Camiva

Pour les **truites adultes**, les prélèvements ont été réalisés par la FDPPMA73 auprès des pêcheurs professionnels entre 2016 et 2023 (Tableau 3). Les otolithes de **66 truites adultes** ont été analysés, dont 62 ont pu être exploités (1 seul otolithe analysé pour 58 individus et les 2 otolithes analysés pour 4 individus). Les tailles des truites étaient comprises entre 18 et 94 cm, avec 12 cohortes représentées, de 2010 à 2021 (Figure 2). Certains otolithes avaient fait l'objet d'inclusion et de ponçage pour des lectures de marques alizarine et ont pu être néanmoins exploités pour les analyses microchimiques après préparations complémentaires. Les individus marqués représentent un tiers de l'échantillon (22 sur 66 individus).

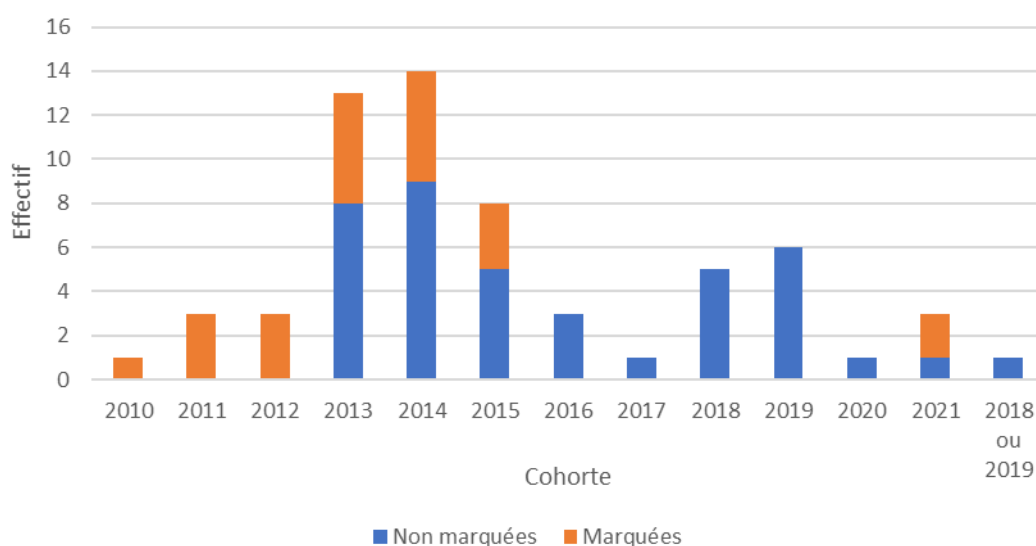


Figure 2: Répartition par cohorte de l'effectif de truites adultes analysées, avec distinction des individus marqués à l'alizarine

Tableau 3: Truites adultes analysées par chimie des otolithes

Code truite	Date capture	Sexe	Taille (mm)	Poid (g)	Age	Cohorte	Marque ARS	Otolithe analysé (Gauche/Droite)
TRL077	06.06.2016		660	4900	5+	2011	oui	G
TRL079	17.06.2016		600	2700	5+	2011	oui	G
TRL081	03.07.2016		420	840	3+	2013	non	D
TRL086	19.07.2016		450	1200	4+	2012	oui	D
TRL088	22.07.2016		430	940	2+	2014	non	D
TRL092	07.09.2016		800	7800	6+	2010	oui	G
TRL093	Eté 2016		450	1100	3+	2013	oui	G
TRL097	13.07.2017	F	600	1800	4+	2013	oui	G
TRL098	09.07.2017	F	465	1100	3+	2014	non	G
TRL101	10.07.2017	F	630	2600	5+	2012	oui	G (vatérite)
TRL102	11.09.2017	F	550	2200	4+	2013	non	G
TRL103	18.07.2017	F	450	1400	3+	2014	oui	G (vatérite)
TRL106	18.08.2017	-	310	3000	2+	2015	non	G
TRL107	07.07.2017	F	400	1300	3+	2014	non	G (Vatérite)
TRL109	27.06.2017	-	600	3800	4+	2013	oui	G
TRL114	2017	-	-	-	4	2013	non	D
TRL115	2017	-	400	2600	4+	2013	non	D
TRL116	06.07.2017	-	450	1300	3+	2014	non	D
TRL121	24.03.2017	-	460	800	4	2013	non	G
TRL123	Aout 2017	F	-	3270	2+	2015	oui	D
TRL127	2016	-	-	-	3+	2013	oui	G
TRL128	26.07.2016	M	400	560	3+	2013	oui	D
TRL130	26.08.2016	M	280	200	2+	2014	oui	G
TRL132	28.06.2016	M	400	560	3+	2013	non	D
TRL133	25.08.2016	F	320	360	2+	2014	oui	D (Vatérite)
TRL135	28.07.2016	-	270	-	2+	2014	oui	G
TRL136	19.07.2016	-	230	-	1+	2015	non	D
TRL139	14.06.2016	-	255	-	1+	2015	oui	D
TRL141	07.04.2016	-	215	-	1+	2015	non	D et G
TRL142	27.09.2016	M	580	2360	4+	2012	oui	D
TRL143	2016	-	-	-	1+	2015	non	D
TRL144	2016	-	-	-	2+	2014	oui	D (Vatérite) et G
TRL145	2016	-	-	-	2+	2014	non	G
TRL151	2016	-	-	-	2+	2014	non	G
TRL153	18.08.2017	F	-	2500	3+	2014	non	D (vatérite)
TRL154	21.07.2017	-	-	1000	4+	2013	non	G
TRL163	12.06.2018	F	640	-	4+	2014	non	G
TRL165	26.07.2018	-	470	1000	3+	2015	non	D
TRL167	15.10.2019	-	780	5350	5+	2014	non	D
TRL168	28.05.2020	M	940	7700	7+	2013	non	D
TRL169	28.04.2020	F	580	2300	4	2016	non	D et G
TRL170	23.06.2020	F	660	3500	4+	2016	non	G
TRL171	13.07.2018	F	530	2000	3+	2015	oui	D
TRL175	15.06.2018	-	860	8000	7+	2011	oui	G (Vatérite)
TRL176	03.03.2021	-	environ 600	-	4	2017	non	G (vatérite au centre?)
TRL181	2020	-	220	-	1+	2019	non	D
TRL182	2020	-	230	-	2	2018	non	D et G
TRL184	2020	-	180	-	1+	2019	non	D
TRL185	2020	-	220	-	2	2018	non	G
TRL186	2020	-	200	-	1+	2019	non	G
TRL190	Début 2022	F	345	461	3	2019	non	G
TRL191	Fin 2021	-	235	200	2	2019	non	G
TRL192	juin.22	-	190	88	1+	2021	non	D
TRL193	juin.22	-	550	2300 vidée	3+	2019	non	G
TRL194	juin.22	-	420	-	4+	2018	non	G
TRL195	sept.22	-	800	-	6+	2016	non	G
TRL197	27.09.2022	-	275	-	1+	2021	oui	D
TRL198	28.04.2022	-	235	150	2+	2020	non	G
TRL199	05.09.2022	-	240	-	1+	2021	oui	G
TRL201	21.04.2022	F	560	1400	4	2018	non	D (Vatérite)
TRL202	16.08.2022	F	740	5300	4+	2018	non	D
TRL203	11.02.2023	-	700	3000	4 ou 5	2018 ou 2019	non	D

3.2 Préparation des otolithes

Dans la mesure du possible, les 2 otolithes ont été extraits. Les otolithes ont d'abord été photographiés dans l'éthanol (Figure 3) de manière à localiser le *nucleus*. Puis chaque otolithe a été inclus en positionnant le *sulcus* vers le haut, dans une goutte de colle Cristalbond préalablement chauffée à 200°C. Après refroidissement, un ponçage minutieux a été réalisé à l'aide de disques de papier silice abrasifs humidifiés avec de l'eau MilliQ (18,2 ΩQ) jusqu'au nucleus, puis les principales rayures ont été ôtées par polissage fin à l'aide d'une solution de poudre d'alumine Al₂O₃. Les lames minces ont ensuite été découpées en vue de leur analyse par spectrométrie de masse couplée à un laser femtoseconde (Plateforme analytique PAMAL, Institut de chimie analytique et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux-IPREM, Université de Pau et des pays de l'Adour-UPPA). Parmi les 40 truitelles prélevées, 1 seul des deux otolithes a été analysé. Plusieurs otolithes n'étaient pas exploitables pour les analyses microchimiques (otolithes dits 'vatéritiques') et ont été retirés.

En outre, certains cours d'eau échantillonnés ont fait l'objet de rempoissonnements à partir de juvéniles de truites lacustres préalablement marquées à l'alizarine Red S (Caudron et Champigneulle, 2006), en particulier le Sierroz et la Leysse aval. Ainsi, les otolithes poncés ont été contrôlés sous microscope à épifluorescence pour vérifier la présence éventuelle de marque alizarine.

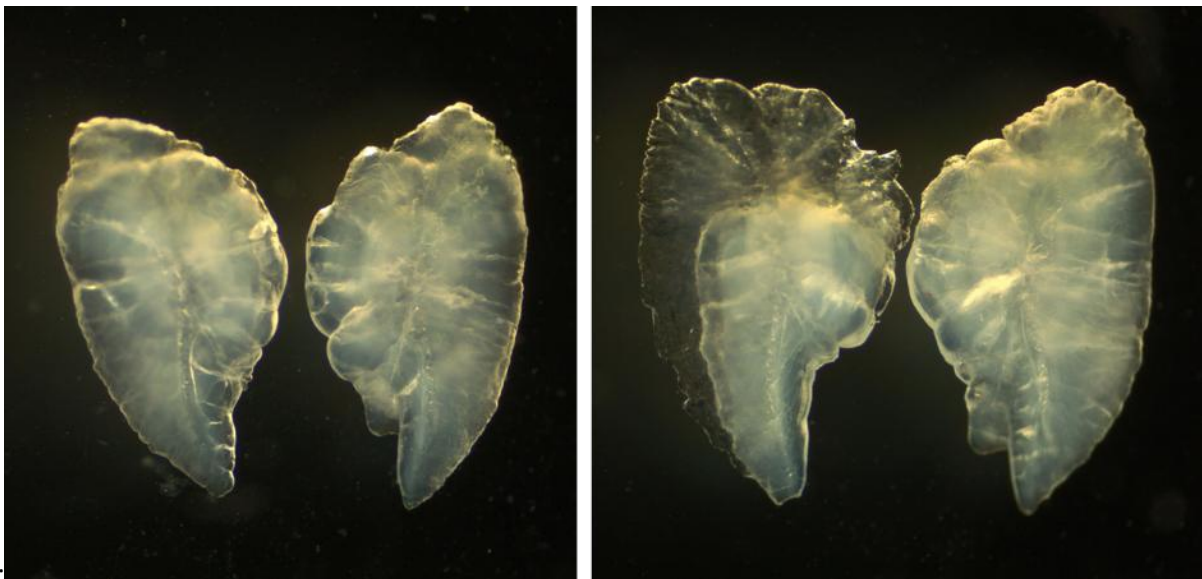


Figure 3 : otolithes de juvéniles de truites photographiés dans l'éthanol sous loupe binoculaire (grossissement x40), à gauche : otolithes normaux, à droite : l'un des otolithes (partie transparente, otolithe de gauche) est vatéritique.

3.3 Analyses chimiques

La composition géochimique des otolithes a été étudiée à l'institut IPREM (UPPA) sous la responsabilité de Gilles Bareille, par ablation laser femtoseconde (Alafamet, Novalase, France) couplée à un spectromètre de masse à plasma induit (ICP-MS) pour l'analyse de 6 éléments chimiques : calcium (Ca), magnésium (Mg), manganèse (Mn), strontium (Sr), Zinc (Zn) et le baryum (Ba). Le magnésium et le zinc, n'apportant pas de pouvoir discriminant, ne seront pas présentés. Le rapport des isotopes du Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) avait été analysé en 2017, en utilisant un spectromètre de masse multicollection à plasma induit (MC-ICP-MS) couplé au même laser femtoseconde. Au vu du fort pouvoir discriminant des analyses élémentaires et de la relative proximité des ratios isotopiques entre les 2 principaux affluents, ces analyses n'ont pas été effectuées sur les prélèvements 2021.

Les analyses élémentaires ont été réalisées en continu sous la forme d'un transect initié entre 50 et 200 μm avant le *nucleus* selon sa visibilité, ceci afin d'être certain de traverser la zone centrale de l'otolithe. Les transects continus se composent d'une acquisition (mesure) toute les 1 s avec une vitesse d'avancé du laser de 5 $\mu\text{m}/\text{s}$, soit un point tous les 5 μm .

Le profil de chaque individu a été observé afin de sélectionner deux zones : la portion du transect correspondant au développement embryolaire (zone centrale de l'otolithe) qui contient la signature maternelle (visualisée par un pic du ratio Mn/Ca), puis la portion correspondant à la période de vie au stade juvénile en rivière (Figure 4). Ces deux zones ont été délimitées d'après les profils et conservées lors des analyses pour pouvoir déterminer :

- **L'origine naturelle vs pisciculture**, à partir de la signature maternelle (zone centrale de l'otolithe, entre 25 et 350 μm du *nucleus* en moyenne). En effet, les poissons de pisciculture ont une signature maternelle distincte de ceux nés de reproduction naturelle en rivière, sachant qu'ils sont issus d'un stock de géniteurs captifs élevé à la pisciculture de Rives à Thonon (stock issu de truites lacustres) qui présente une composition chimique en Sr / Ca suffisamment différente des affluents du lac du Bourget (voir exemple Figure 4);
- **Le cours d'eau de croissance des alevins**, à partir de la zone juvénile (en général comprise entre 425 et 625 μm du *nucleus*). Cette information est également disponible pour les individus issus de pisciculture, puisque les déversements ont été réalisés directement en affluents au printemps. Dans la zone juvénile, la signature microchimique des truites issues de repeuplement correspond donc à celle de la rivière d'introduction.

Les deux zones d'intérêt peuvent néanmoins être plus longues ou plus courtes, ou démarrer avant ou après les limites fixées, en fonction du taux de croissance de chaque individu. La zone en bordure de l'otolithe est systématiquement écartée car elle est susceptible de présenter des artefacts. Les zones retenues ont été ajustées manuellement pour chaque individu afin d'exclure la zone correspondant au grossissement dans le lac. Celle-ci a pu être en général repérée grâce aux variations du Sr/Ca et/ou du Ba/Ca. La valeur moyenne a ensuite été déterminée pour chacun des ratios élémentaires et chacune des deux zones d'intérêt (zone maternelle et zone juvénile).

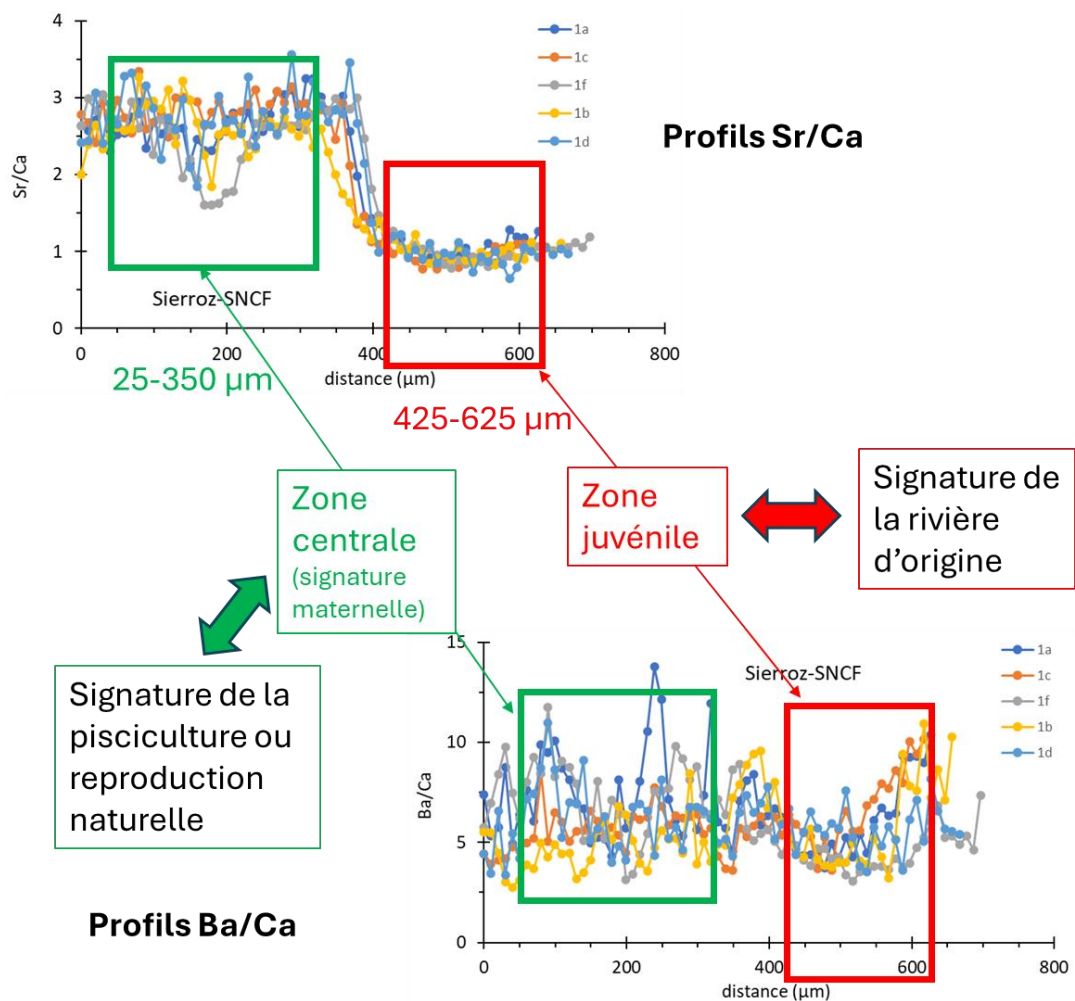


Figure 4: Exemples de profils de 5 otolithes de truites juvéniles du Sierroz montrant les 2 parties des otolithes retenues. Les profils du haut représentent le ratio Sr/Ca et les profils du bas le ratio Ba/Ca. Ces truites représentent d'autre part des individus issus de la pisciculture, qui est caractérisée par de fortes valeurs en Sr/Ca (zone centrale) par rapport au Sierroz (zone juvénile).

3.4 Analyses statistiques

Les ratios élémentaires (Sr/Ca, Sr/Ba, Ba/Ca) ont été analysés par une analyse discriminante de type *Random Forest* (RF). Cette technique repose sur les arbres de classification et de régression (CART) et exploite la robustesse d'une approche par ensemble (*bagging*). Elle est utilisée pour modéliser et prédire les relations entre un ensemble de variables prédictives (données élémentaires) et une seule variable réponse (Rivière d'origine, Breiman, 2001). Contrairement aux méthodes paramétriques plus 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 (linéarité de la relation, distributions convexes et homoscédastiques, *etc.*), 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 ; Richard *et al.*, 2019).

Le principe général consiste d'abord à établir un modèle discriminant basé sur les données des truitelles dont l'origine est connue (phase d'entraînement/apprentissage). Pour chaque truitelle, les données multiélémentaires en chaque point de mesure le long du profil de l'otolithe (un point tous les 5µm) correspondant à la zone rivière et à la zone centrale (ou zone maternelle) pour les individus de pisciculture sont utilisées. Les performances du modèle ont été estimées par validation croisée, afin d'éviter tout raisonnement circulaire et artificiellement surestimer ces performances. Pour ce faire, seule une fraction des données initiales ($\frac{3}{4}$ des données, appelées '*in-bag*') a été utilisée pour construire le modèle discriminant (RF, 1000 arbres). 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. Afin de s'assurer de la robustesse du modèle, l'étape précédente a été réitérée 1'000 fois de façon indépendante. Le modèle ainsi construit par l'ensemble des 10'000 arbres a pu être utilisé pour déterminer l'origine natale des truites adultes capturées par les pêcheurs.

Afin de ne pas multiplier les modèles et après avoir réalisé des tests préliminaires de discrimination à différentes échelles spatiales (regroupement de rivières), un seul modèle intégrant 4 origines parmi les cinq initiales (pisciculture, Sierroz, Leysse, Hyères et Nant Varon) a été conservé. Les quatre origines étaient les suivantes : Pisciculture, Sierroz, Leysse-Hyères et Nant Varon. La Leysse n'étant pas différentiable de son affluent l'Hyères, les deux cours d'eau ont donc été regroupés sous le même ensemble.

Sur les truites adultes (phase de test), le modèle a attribué une probabilité d'assignation relative de l'origine natale pour la 'zone centrale' et pour la 'zone juvénile' de l'otolithe d'après les données chimiques élémentaires de ces deux zones.

Pour ce qui est de la zone centrale de l'otolithe, la signature de cette zone pouvait être soit celle de la pisciculture, soit celle de la rivière où la génitrice est venue pondre, ou alors une signature intermédiaire entre la rivière de ponte et la signature du lac. Dans ce contexte, il a été décidé de définir pour la zone centrale exclusivement deux origines, pisciculture vs reproduction naturelle, l'attribution par le modèle d'une origine Sierroz, Leysse-Hyères ou Nant Varon étant alors regroupée sous l'origine 'reproduction naturelle'.

Pour ce qui est de la 'zone juvénile, une probabilité a été déterminée de la même manière pour chaque point dans la zone « juvénile de l'otolithe » afin de déterminer le cours d'eau ou le groupe de cours d'eau où les individus ont grandi avant de rejoindre le lac. Pour chaque point analysé au sein de la zone retenue dans l'otolithe, une probabilité relative a été assignée aux différents groupes, et l'assignation à un groupe a été validée lorsque la probabilité d'assignation dépassait 75% sur la moyenne des points analysés. Pour les individus douteux ou non directement assignés, une expertise complémentaire sur le profil d'analyses a permis de valider certaines origines. En effet, pour cette zone de l'otolithe, seulement 3 origines étaient possibles, Sierroz, Leysse-Hyères et Nant Varon, l'attribution d'une origine pisciculture n'étant plus possible. Il a été cependant vérifié que le modèle n'attribuait pas cette origine pisciculture ou hésitait entre une origine rivière et l'origine pisciculture, et lorsque cela était le cas, l'origine rivière a été retenue.

4 RESULTATS - INTERPRETATIONS

4.1 Analyses chimiques des otolithes de truites juvéniles

4.1.1 Exemples de profils élémentaires

Les profils élémentaires montrent une variabilité importante tant dans la zone centrale ou maternelle (0 à 300 ou 400 μm) que dans la zone juvénile (400-600 μm environ, voir Figure 5). Certaines signatures plus élevées sur le ratio Sr/Ca dans la zone maternelle indiquent que ces individus proviennent de la pisciculture.

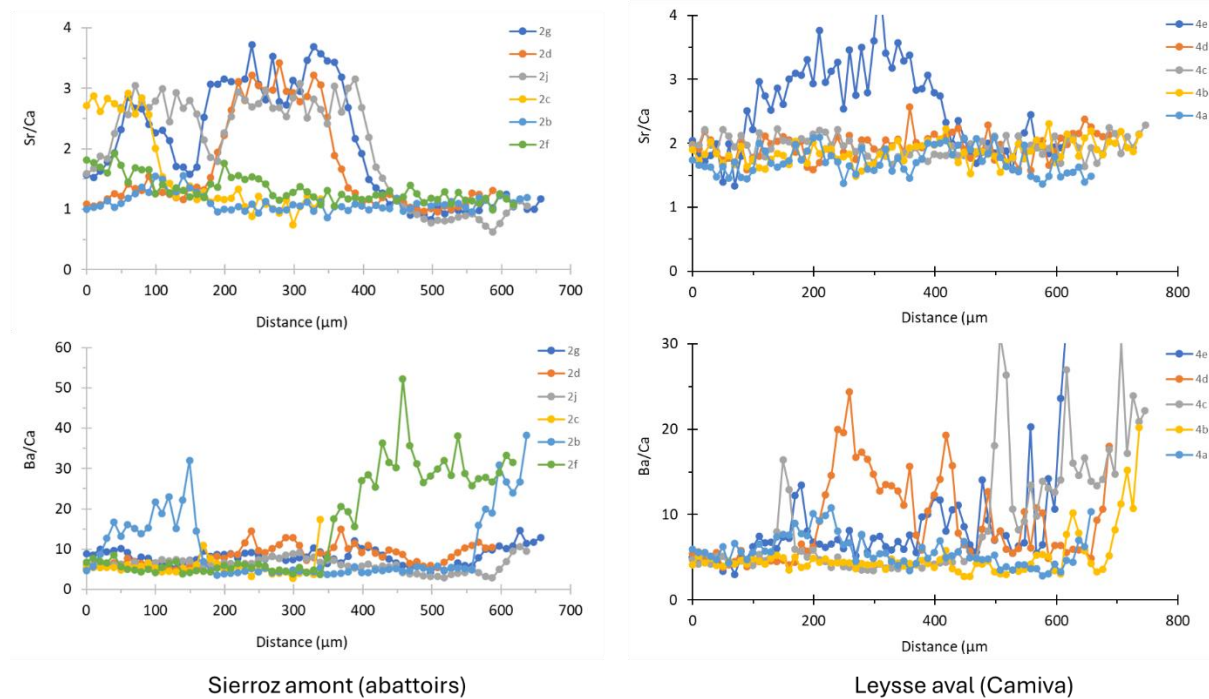


Figure 5 : Profils des otolithes de truites prélevées sur le Sierroz (station abattoirs) et la Leyse (station Camiva). Les ratios élémentaires Ba/Ca et Sr/Ca sont présentés pour tous les otolithes analysés sur ces 2 stations en 2021.

4.1.2 Résultats des analyses chimiques

Les valeurs moyennes des ratios élémentaires des juvéniles de truites prélevés en 2017 et 2021 sont présentées dans la Figure 6 et dans le Tableau 4. Les individus prélevés en 2017 et 2021 montrent des valeurs très comparables (Tableau 4). Il apparaît une forte discrimination des rivières d'origine principalement selon le ratio Sr/Ca, avec 4 groupes bien identifiés :

- Nant Varon : Sr/Ca très faible (< 0.6)
- Sierroz : Sr/Ca entre 0.6 et 1.3
- Hyères et Laysse non discriminées : Sr/Ca entre 1.3 et 2.5
- Pisciculture (mesure dans la zone centrale de l'otolithe): Sr/Ca > 2.5

Les ratios élémentaires Ba/Ca et Sr/Ba se montrent peu discriminants. Ils seront toutefois conservés pour la suite des analyses multivariées.

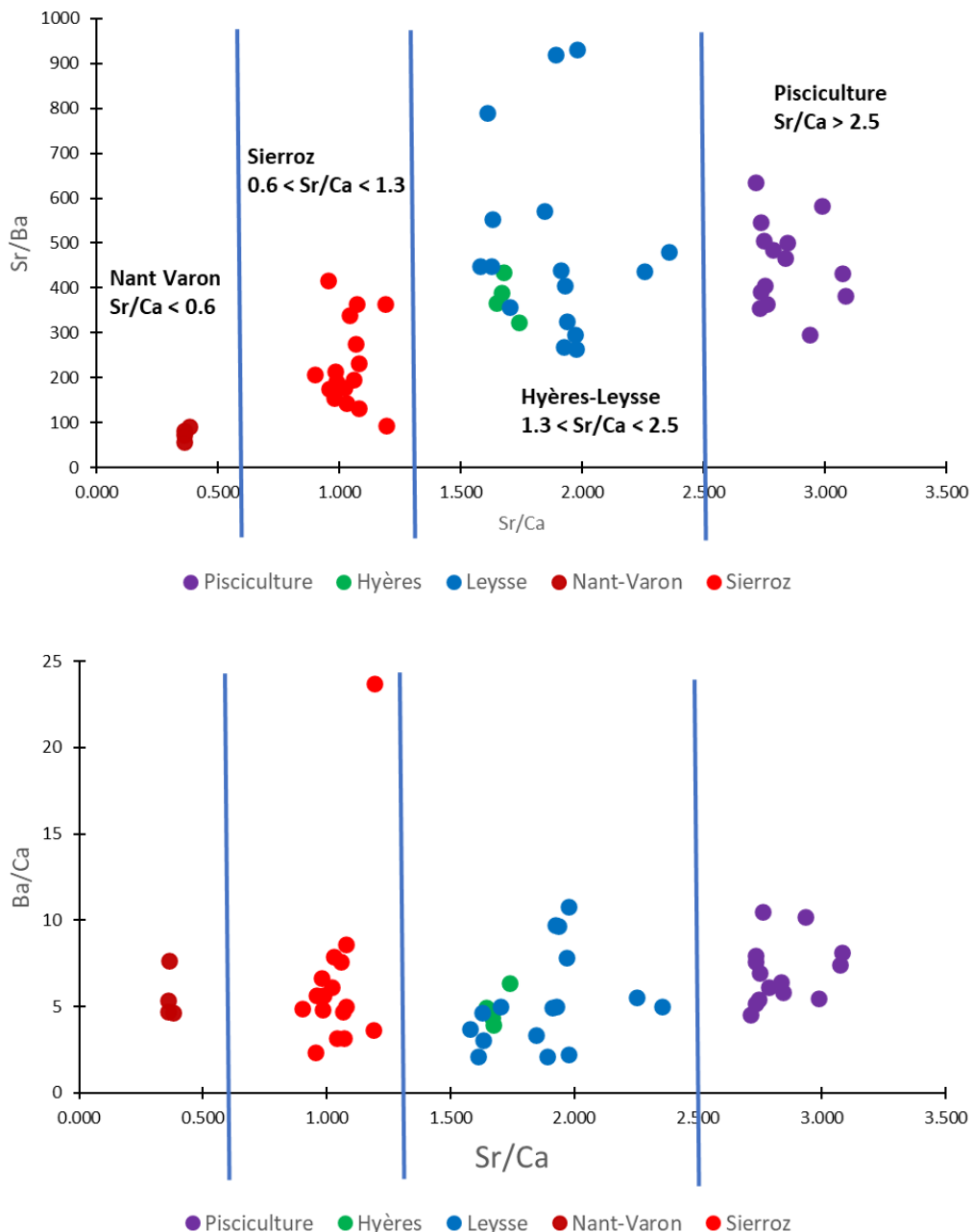


Figure 6 : Ratios élémentaires moyens mesurés dans la zone juvénile et dans la zone maternelle (pour les individus d'origines 'pisciculture') des otolithes des 40 truites juvéniles analysées.

Tableau 4 : Valeurs moyennes des différents ratios élémentaires dans la zone « juvénile » de l'otolithe des 40 juvéniles de truites analysées.

code_poisson	Année	Bassin	Lieu capture	Site	Origine Pisciculture		Microchimie zone juvénile		
					Microchimie	Marque ARS	Sr/Ca	Sr/Ba	Ba/Ca
12L-1	2017	Leysse	Leysse	Tremblay			1.63	552.36	3.04
12L-2	2017	Leysse	Leysse	Tremblay			1.84	571.48	3.33
12L-3	2017	Leysse	Leysse	Tremblay			1.58	447.96	3.72
12L-4	2017	Leysse	Leysse	ZI			1.61	790.42	2.13
12L-5	2017	Leysse	Leysse	ZI			1.98	930.48	2.23
12L-6	2017	Leysse	Leysse	ZI			1.89	918.96	2.09
F073-3aD	2021	Leysse	Leysse (amont)	Pont des Carmes			1.94	326.20	9.69
F073-3bG	2021	Leysse	Leysse (amont)	Pont des Carmes			1.93	404.72	5.01
F073-3cD	2021	Leysse	Leysse (amont)	Pont des Carmes			2.25	438.35	5.54
F073-3dD	2021	Leysse	Leysse (amont)	Pont des Carmes			2.35	480.18	5.03
F073-3eD	2021	Leysse	Leysse (amont)	Pont des Carmes			1.63	448.93	4.63
F073-4aD	2021	Leysse	Leysse (aval)	Camiva			1.70	356.60	5.00
F073-4bD	2021	Leysse	Leysse (aval)	Camiva			1.91	439.49	4.92
F073-4cD	2021	Leysse	Leysse (aval)	Camiva			1.97	264.36	10.80
F073-4dD	2021	Leysse	Leysse (aval)	Camiva			1.97	296.70	7.86
F073-4eD	2021	Leysse	Leysse (aval)	Camiva	X	X	1.92	269.75	9.73
F073-6aD	2021	Leysse	Hyères	La Boisse	X	X	1.64	367.47	4.97
F073-6bG	2021	Leysse	Hyères	La Boisse	X	X	1.67	436.05	3.97
F073-6cD	2021	Leysse	Hyères	La Boisse	X	X	1.67	389.27	4.38
F073-6eD	2021	Leysse	Hyères	La Boisse	X	X	1.74	322.39	6.39
F073-5aD	2021	Leysse	Nant-Varon	Nant-Varon			0.38	90.80	4.63
F073-5bD	2021	Leysse	Nant-Varon	Nant-Varon			0.36	83.08	4.74
F073-5cD	2021	Leysse	Nant-Varon	Nant-Varon			0.36	73.71	5.37
F073-5dD	2021	Leysse	Nant-Varon	Nant-Varon			0.36	56.62	7.66
S2	2017	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF			0.95	416.89	2.36
S4	2017	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF			1.07	275.38	4.72
S5	2017	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF			1.07	365.14	3.20
S6	2017	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF			1.19	364.67	3.63
S7	2017	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF			1.04	339.01	3.15
F073-2bD	2021	Sierroz	Sierroz	Abattoirs		X	1.06	196.82	7.62
F073-2cD	2021	Sierroz	Sierroz	Abattoirs	X		1.08	231.41	5.01
F073-2dD	2021	Sierroz	Sierroz	Abattoirs	X	X	1.08	132.08	8.62
F073-2fD	2021	Sierroz	Sierroz	Abattoirs		X	1.19	93.87	23.68
F073-2gD	2021	Sierroz	Sierroz	Abattoirs	X	X	1.03	142.99	7.87
F073-2jD	2021	Sierroz	Sierroz	Abattoirs	X	X	0.90	206.69	4.86
F073-1aD	2021	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF	X	X	1.02	177.81	6.15
F073-1bD	2021	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF	X	X	0.99	191.15	5.66
F073-1cD	2021	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF	X	X	0.98	155.47	6.65
F073-1dD	2021	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF	X		0.96	175.29	5.67
F073-1fD	2021	Sierroz	Sierroz	Pont SNCF	X	X	0.98	213.68	4.83

L'origine pisciculture (repeuplement) a été déterminée par 2 méthodes :

- à partir de la lecture des marques alizarine dans l'otolithe sous microscope à épifluorescence ('marque ARS' dans le tableau 4) ;
- par l'analyse des signatures chimiques dans la zone centrale de l'otolithe (colonne 'microchimie'), qui montrent des valeurs > 2.5 pour le ratio Sr/Ca chez les individus issus de repeuplement (Figure 6).

On constate que **les 2 méthodes sont concordantes pour 36 individus sur les 40 analysés** (90% d'assignation identique). Pour 2 individus issus du Sierroz, des marques alizarine étaient visibles sans signature chimique caractéristique de la pisciculture en zone centrale de l'otolithe. A l'inverse, 2

individus présentent des signatures microchimiques caractéristiques sans présence de marque alizarine, ce qui peut suggérer que les marques alizarines étaient de trop faible intensité pour être détectée. **Les individus issus d'alevinage sont essentiellement présents dans l'Hyères, affluent de la Leysse (4 individus sur 4) et le Sierroz** (tous les individus capturés en 2021 sont considérés comme issus de l'alevinage par l'une ou l'autre des méthodes). Seul 1 individu dans la Leysse serait issu d'alevinage (1 sur 5, station Camiva). En 2017, année sans alevinage, comme attendu tous les juvéniles présentaient une signature caractéristique de la rivière d'origine dans la zone centrale de l'otolithe.

4.1.3 Assignation des origines natales et des cours d'eau d'origine

L'analyse *Random Forest* a été appliquée sur les données chimiques élémentaires des zones juvéniles des otolithes (rivière de croissance) et des zones centrales (pour les individus issus de pisciculture seulement) sur la base de 4 « groupes » distincts (Leysse-Hyères, Nant Varon, Sierroz et Pisciculture). Les résultats montrent un **très faible taux d'erreur de reclassification (0.004%) entre les groupes et plus de 92% d'individus assignés distinctement à 1 seul groupe** (8% d'individus non assignés), en retenant un seuil d'attribution de 0,75. Ce seuil signifie qu'un individu est assigné à un groupe lorsque sa probabilité d'assignation à ce groupe dépasse 75% (moyenne de l'ensemble des points du profil). Les quelques individus non assignés correspondent à des positionnements intermédiaires entre 2 groupes.

4.2 Analyse chimique des otolithes de truites adultes

4.2.1 Exemples de profils élémentaires

Les profils élémentaires ont été analysés pour retenir la zone centrale, caractéristique de l'origine natale (repeuplement ou naturelle), et la zone dite « juvénile » qui caractérise le cours d'eau de grossissement (Figure 7).

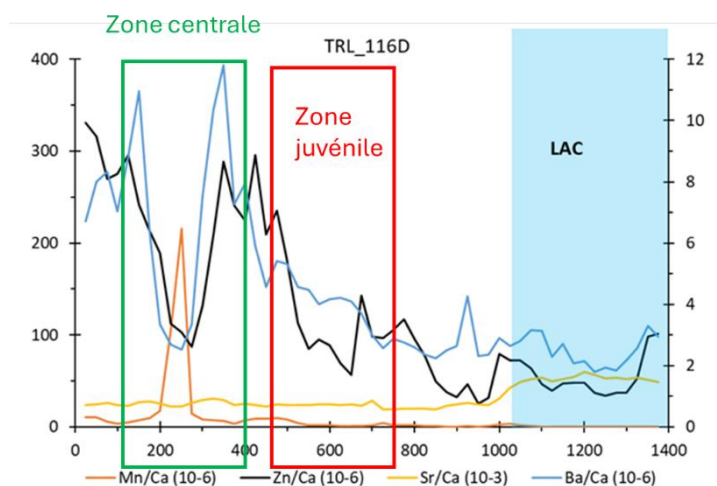


Figure 7: Exemple de profils élémentaires dans un otolithe de truite adulte. La zone maternelle est généralement caractérisée par un pic de manganèse Mn/Ca. Le passage au lac s'observe par le changement de signature Sr/Ca.

4.2.2 Résultats des analyses chimiques

Les signatures élémentaires moyennes des truites adultes ont été représentées dans le même plan que celles des truites juvéniles, pour la zone centrale de l'otolithe (Figure 8) et la zone juvénile (Figure 9).

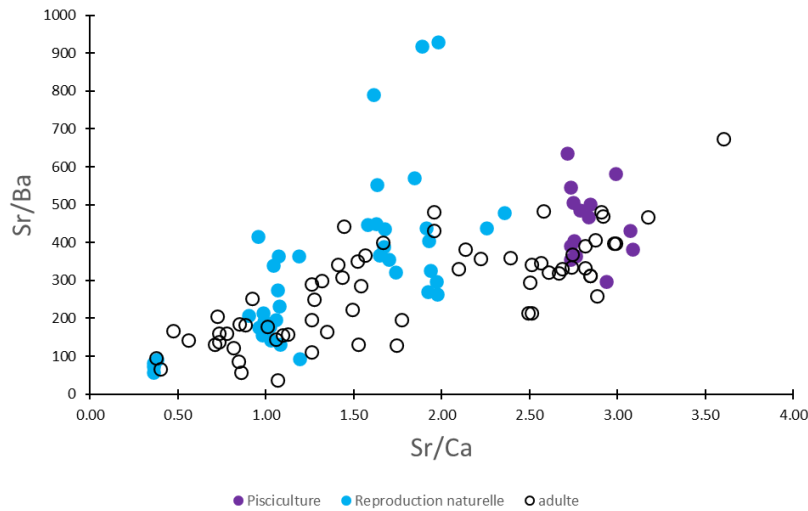


Figure 8: Représentation des signatures chimiques moyennes des truites adultes (Sr/Ca et Sr/Ba), dans la zone « centrale » (= maternelle) de l'otolithe. Les signatures des juvéniles issus de reproduction naturelle ou de pisciculture sont projetées dans le même plan.

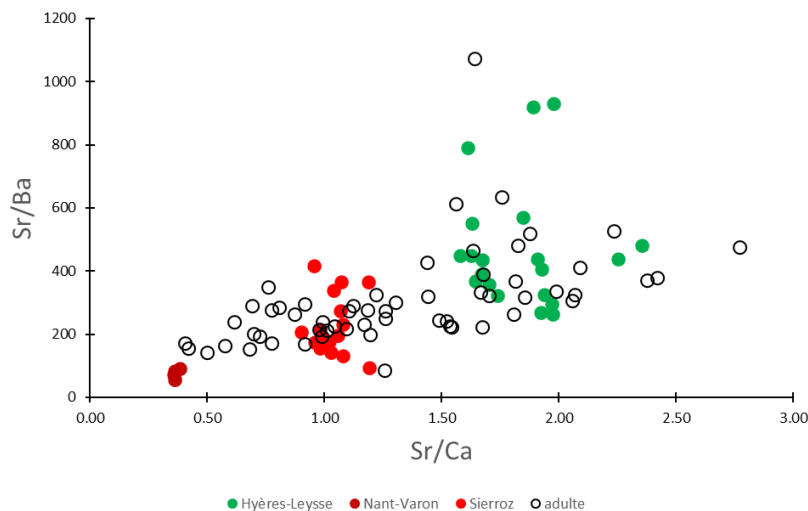


Figure 9 : Représentation des signatures chimiques moyennes des truites adultes (Sr/Ca et Sr/Ba), dans la zone « juvénile » de l'otolithe. Les signatures des 3 origines de juvéniles sont projetées dans le même plan.

Les signatures chimiques des truites adultes se rapprochent de certains groupes au sein des juvéniles. Cette proximité a été analysée par *Random Forest* afin de déterminer pour chaque truite adulte une probabilité d'assignation à chacun des groupes.

4.2.3 Assignation des origines natales (reproduction naturelle vs repeuplement) et des cours d'eau d'origine

Chaque truite adulte a fait l'objet d'une assignation pour son origine natale (reproduction naturelle vs repeuplement) après l'analyse de la zone centrale de l'otolithe et d'une assignation à l'un des cours d'eau d'origine (Leysse-Hyères, Nant Varon et Sierroz) d'après l'analyse de la zone juvénile.

Tableau 5 : Résultats des assignations par Random Forest des truites adultes analysées

Code truite	Marque ARS	Origine natale	Rivière d'origine	Otolithe analysé
TRL077	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	G
TRL079	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	G
TRL081	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D
TRL086	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	D
TRL088	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D
TRL092	oui	douteux	Leysse - Hyères	G
TRL093	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	G
TRL097	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	G
TRL098	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	G
TRL101	oui	douteux	-	G (vatérite)
TRL102	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL103	oui	douteux	-	G (vatérite)
TRL106	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL107	non	Reproduction naturelle	-	G (Vatérite)
TRL109	oui	douteux	Sierroz	G
TRL114	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D
TRL115	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D
TRL116	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D
TRL121	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL123	oui	douteux	douteux	D
TRL127	oui	douteux	Leysse - Hyères	G
TRL128	oui	douteux	Sierroz	D
TRL130	oui	Pisciculture	Sierroz	G
TRL132	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D
TRL133	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	D (Vatérite)
TRL135	oui	Pisciculture	Sierroz	G
TRL136	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D
TRL139	oui	Pisciculture	Sierroz	D
TRL141	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D et G
TRL142	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	D
TRL143	non	douteux	Sierroz	D
TRL144	oui	Pisciculture	Sierroz	D (Vatérite) et G
TRL145	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL151	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL153	non	Reproduction naturelle		D (vatérite)
TRL154	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	G
TRL163	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	G
TRL165	non	douteux	douteux	D
TRL167	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D
TRL168	non	Pisciculture	Leysse - Hyères	D
TRL169	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D et G
TRL170	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	G
TRL171	oui	Reproduction naturelle	Sierroz	D
TRL175	oui	Pisciculture		G (Vatérite)
TRL176	non	Reproduction naturelle		G (vatérite au centre?)
TRL181	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D
TRL182	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D et G
TRL184	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D
TRL185	non	Reproduction naturelle	Nant-Varon	G
TRL186	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL190	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL191	non	Reproduction naturelle	Nant-Varon	G
TRL192	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D
TRL193	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL194	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL195	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL197	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	D
TRL198	non	Reproduction naturelle	Sierroz	G
TRL199	oui	Pisciculture	Leysse - Hyères	G
TRL201	non	Reproduction naturelle	Sierroz	D (Vatérite)
TRL202	non	Reproduction naturelle	Nant Varon	D
TRL203	non	Reproduction naturelle	Leysse - Hyères	D

Parmi des 62 individus analysés, 1 individu a été sorti car son transect était visiblement inversé (n°165). Sur les 61 individus, 53 individus ont été assignés à l'une des deux origines natales d'après leurs signatures chimiques : 15 individus issus de l'alevinage (tous marqués à l'alizarine) et 38 issus de reproduction naturelle (dont 1 seul marqué à l'alizarine). **La chimie des otolithes a donc confirmé l'origine pisciculture ou reproduction naturelle pour 98% des adultes assignés à une origine (52 sur les 53 otolithes assignés)**. Les 8 individus non assignés à une origine ('douteux' dans Tableau 5) présentent une signature intermédiaire entre les individus de pisciculture et ceux de la Leyse ; toutefois pour 7 d'entre eux une marque alizarine a été détectée, ces derniers peuvent donc être considérés comme issus du repeuplement. Au final, cela a conduit à la détermination de l'origine natale pisciculture ou reproduction naturelle de 59 individus sur les 62 analysés.

La rivière d'origine a été déterminée pour 54 individus sur les 61 individus conservés dans l'analyse : les otolithes de 6 individus étaient en effet vatéritiques dans la zone juvénile, donc inexploitable, et 1 individu n'a pas pu être assigné (douteux). Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 6 et la Figure 10.

Tableau 6 : Résultats des assignations des truites adultes à leur rivière d'origine en fonction de leur origine natale (Marqué ARS = pisciculture ; Non marqué ARS = reproduction naturelle)

Rivière d'origine	Non marqué ARS	Marqué ARS	Total général
Leyse - Hyères	13	11	24
Nant Varon	3		3
Sierroz	20	7	27
Total général	36	18	54

Les résultats indiquent des contributions similaires entre le bassin du Sierroz et de la Leyse. Si l'on ajoute les individus assignés au Nant Varon à ceux de la Leyse et l'Hyères, les effectifs s'élèvent à 27 individus par bassin soit 50%. Le Nant Varon étant un petit affluent de la Leyse, sa contribution au stock de truites lacustres reste limitée (6%).

Il est intéressant de constater que la contribution du repeuplement diffère entre les deux bassins : les truites lacustres issues du Sierroz sont à 74% d'origine naturelle, alors que celles provenant de la Leyse sont à 59% d'origine naturelle (mais seulement 48% sans le Nant Varon). Au vu des faibles effectifs, ces différences de contribution ne sont pas significatives, y compris en retirant le Nant Varon (test χ^2 de Pearson, $p=0.14$).

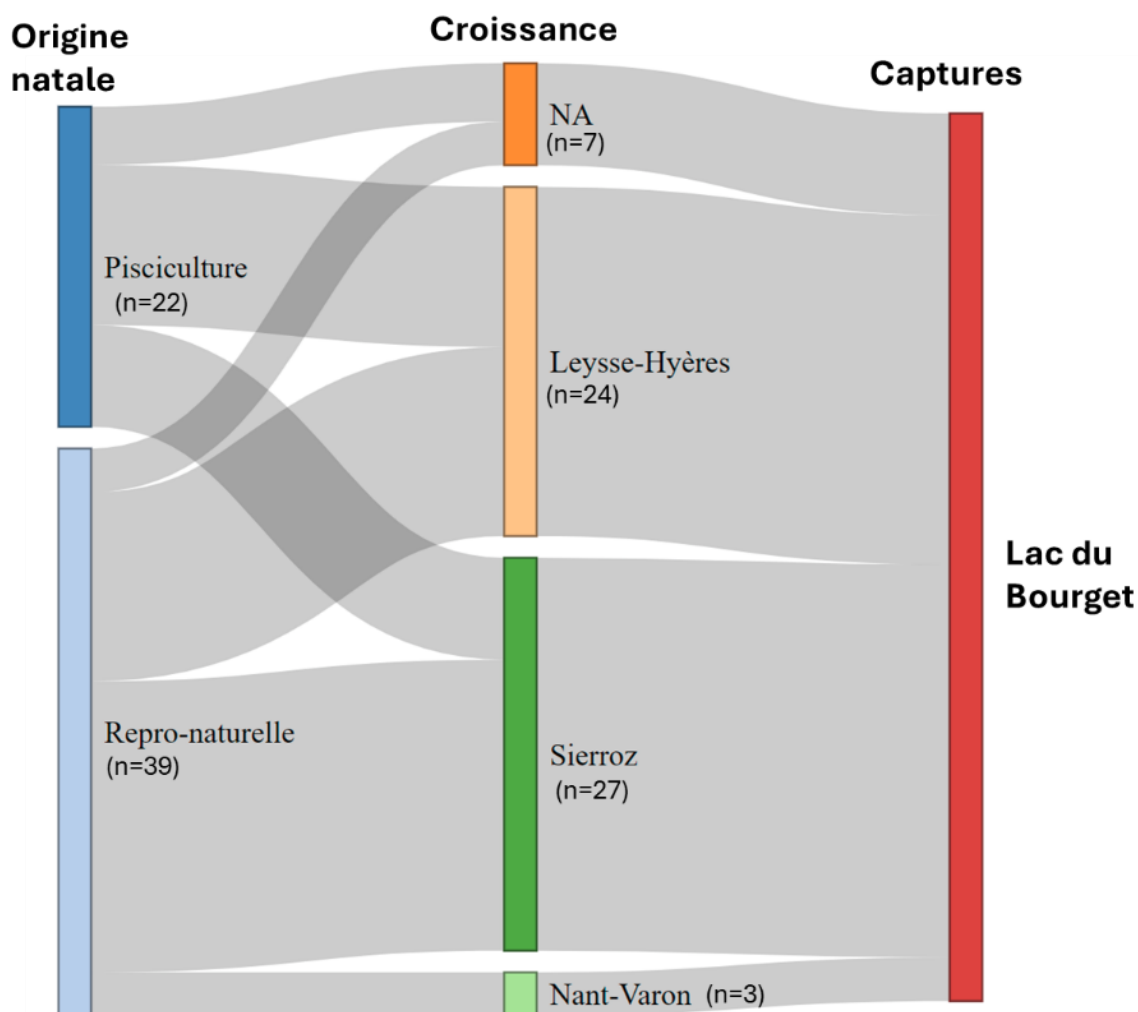


Figure 10 : Diagramme de Sankey représentant la répartition des truites adultes en fonction de leur origine natale (d'après les marquages ARS) puis de leur cours d'eau d'origine (ou de croissance) d'après la chimie des otolithes.

5 Discussion

L'analyse chimique des otolithes de juvéniles de truites lacustres issues des principaux affluents du lac du Bourget a permis de **différencier distinctement 3 origines naturelles (Leysse-Hyères, Sierroz et Nant Varon) et l'origine « pisciculture »** grâce au ratio Strontium/Calcium (Sr/Ca) qui s'est révélé très discriminant sur les cours d'eau étudiés à la différence des autres ratios élémentaires (Sr/Ba et Ba/Ca). Les résultats des analyses préliminaires réalisées en 2017 (Richard *et al.*, 2019) sont confirmées sur les prélèvements réalisés en 2021, ce qui souligne une certaine stabilité temporelle du ratio Sr/Ca dans les otolithes, et donc de ce signal dans l'environnement.

L'analyse discriminante par *Random Forest* des signatures chimiques mesurées dans la zone centrale des otolithes a permis de confirmer les origines natales (pisciculture vs reproduction naturelle) évaluées par marquage à l'alizarine Red S. Les résultats convergent dans plus de 90% des cas sur les juvéniles et 98% des cas chez les adultes, ce qui confirme que **la chimie des otolithes peut**

être utilisée pour évaluer la contribution du repeuplement au même titre que les marquages à l'alizarine.

L'information supplémentaire apportée par la chimie des otolithes concerne le cours d'eau de croissance des truites au stade juvénile. L'information a pu être extraite chez 54 des 61 otolithes de truites adultes analysées, ce qui représente un taux global d'assignation de 88%. **Les contributions des deux principaux bassins (Leysse et Sierroz) au stock de truites lacustres sont équivalentes (proches de 50%), avec cependant une fraction issue de reproduction naturelle légèrement plus importante dans le Sierroz que dans la Leysse (74% vs 59%).**

Ces informations sont intéressantes dans l'optique d'orienter la gestion future. Le repeuplement représente une part importante des captures de truites provenant des deux principaux bassins. L'échantillon analysé étant assez restreint, il n'était pas judicieux de dissocier les cohortes ou de détailler les résultats par période. En effet, les deux tiers des échantillons ont été collectés sur la période 2010-2015. Or, la contribution de l'alevinage dans les captures après 2015 semble montrer une tendance à la baisse, et des travaux récents de restauration ont été réalisés sur le bassin de la Leysse. Pour ces raisons, l'analyse chimique complémentaire d'otolithes récents peut être pertinente afin de suivre l'évolution temporelle de la fraction issue du repeuplement et de la contribution des affluents majeurs au sein du stock de truites lacustres, en lien avec les aménagements réalisés.

6 Références

- Bareille G., Vignon M., Chappaz A., Fontaine A., Tabouret H., Morat. F., , Martin J., Aymes J.C., Daverat F., Pécheyran C., Donard O.F.X., 2024. Freshwater fish otoliths record signals from both water and physiological processes: New insights from Sr/Ca and Ba/Ca ratios. *CIFAS* 81(2): 223-240
- Breiman L. 2001. Random forests. *Machine Learning* 45(1): 5-32.
- Caudron A. and 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.
- 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(1): 2783-2792.
- 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(4): 1352-1364.
- Proner D. *et al.*, 2022. Suivi de la truite lacustre sur le bassin versant du lac du Bourget, FDPPMA 73, p62.
- Richard A, Bareille G., Caudron A., Collet M.A., Dorioz J.M., Vignon M., 2019. Recherche de l'origine natale des truites du Léman à partir de la composition géochimique des otolithes. Rapport final. 49p.