



HAL
open science

Evaluation de la contribution du repeuplement dans le stock de brochets du lac de Serre-Ponçon par la composition géochimique des otolithes

Alexandre Richard, Arnaud Caudron, Gilles Bareille, Hélène Tabouret

► To cite this version:

Alexandre Richard, Arnaud Caudron, Gilles Bareille, Hélène Tabouret. Evaluation de la contribution du repeuplement dans le stock de brochets du lac de Serre-Ponçon par la composition géochimique des otolithes. [Rapport de recherche] IPREM - Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux; SCIMABIO Interface, 5 rue des quatre vents, les cyclades B, Thonon-les-Bains, France. 2020. hal-03143830

HAL Id: hal-03143830

<https://univ-pau.hal.science/hal-03143830>

Submitted on 17 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.

Evaluation de la contribution du repeuplement dans le stock de brochets du lac de Serre-Ponçon par la composition géochimique des otolithes

Note technique



Version du 10 Novembre 2020

Collaborations :



Auteurs :

Alexandre RICHARD¹

Arnaud CAUDRON¹

Gilles BAREILLE²

Hélène TABOURET²

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

2. UMR IPREM 5254 CNRS/UPPA, 2 avenue du Président Angot, 64053 Pau, France

Citation :

Richard A., Caudron A., Tabouret H., Bareille G., 2020. Evaluation de la contribution du repeuplement dans le stock de brochets du lac de Serre-Ponçon par la composition géochimique des otolithes. Note technique. 19p.

1 Rappels du contexte et de la problématique

Le lac de Serre-Ponçon est une retenue hydroélectrique d'une superficie de 2'894 ha et d'une profondeur maximale de 110m au droit du barrage, alimentée par la Durance et l'Ubaye. Cette retenue présente une double vocation : la production électrique et la constitution d'une réserve de 140 millions de m³ utilisée pour l'irrigation des exploitations agricoles dans la vallée de la Durance. Avec une cote maximale à 780m NGF et une cote minimale d'exploitation fixée à 722m NGF, le marnage peut atteindre 58m ; il se caractérise par une périodicité saisonnière marquée de remplissage / destockage (Figure 1) et une forte variabilité interannuelle.

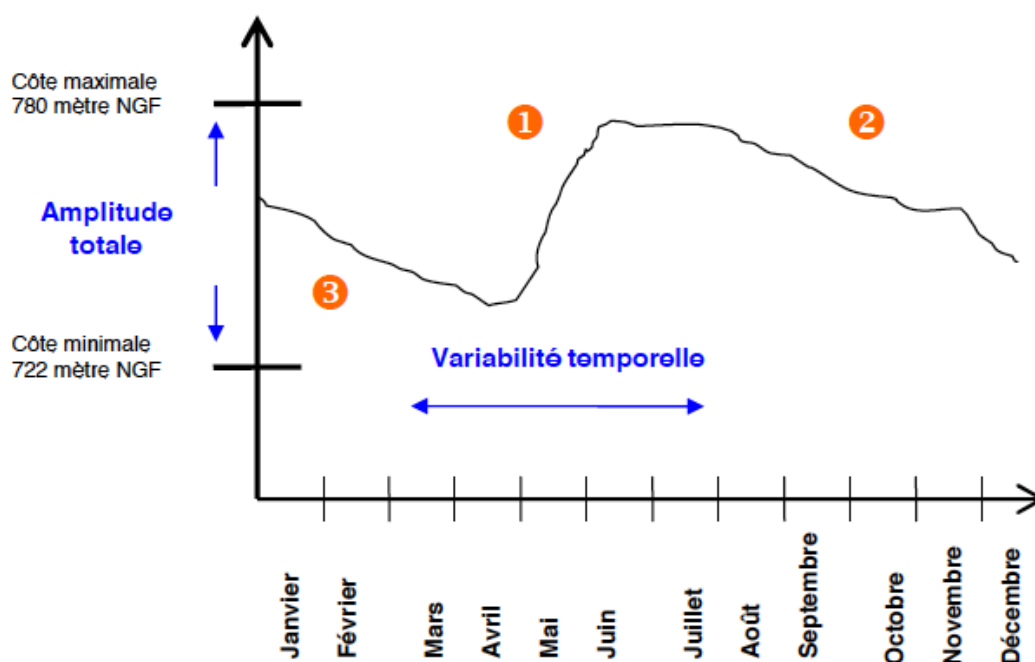


Figure 1 : Variations saisonnières de la cote de la retenue de Serre-Ponçon, avec 3 périodes distinctes : 1. Période de remplissage printanier à la fonte des neiges ; 2. Période de déstockage estival et automnal en partie liée aux besoins agricoles ; 3. Période de déstockage hivernal pour assurer les besoins en énergie.

Dans ce contexte, la reproduction des espèces dites phytophiles (qui pondent leurs œufs dans la végétation aquatique) peut être perturbée, notamment si les périodes de frai coïncident avec les périodes d'exondation des herbiers subaquatiques. Ces herbiers, à l'exemple de *Rorippa sylvestris*, sont généralement présents entre les côtes 770 et 780 NGF, et ne sont accessibles qu'à partir du mois de juin.

Dans le cas du brochet, l'accès des géniteurs aux sites de frai est par conséquent incertain. L'espèce se reproduit en effet généralement entre avril et mai dans les plans d'eau alimentés principalement par la fonte des neiges. On considère généralement que la ponte s'opère dès que la température de l'eau atteint 6 à 8°C, avec un *preferendum* vers 8-10 °C. Cette température est atteinte en avril-mai alors qu'une majorité des surfaces d'herbiers est exondée. En juin, lorsque la cote de la retenue est suffisante et dépasse les 770m, la température peut déjà dépasser les 15°C et devenir limitante pour la fraie. Toutefois, des observations de femelles pleines d'œufs ou ayant récemment

pondu ont déjà été réalisées au moins de juin, ce qui tendrait à prouver que le brochet s'est adapté à ces conditions et qu'une reproduction naturelle tardive pourrait s'opérer. Si tel est le cas, la contribution de la reproduction naturelle dans le recrutement de l'espèce reste à quantifier.

En parallèle, la population de brochet du lac de Serre-Ponçon est soutenue depuis plusieurs années par du rempoissonnement réalisé à partir d'alevins produits dans un étang de pisciculture de la Dombes. Ces alevins sont mis à l'eau au printemps (fin avril). Aucune donnée ne permet actuellement d'évaluer l'efficacité de cette pratique.

2 Intérêt de la géochimie des otolithes

La détermination de l'origine natale (affluents spécifiques, piscicultures) des poissons est possible aujourd'hui grâce à l'analyse d'éléments traces et/ou de rapports isotopiques contenus dans des pièces calcifiées (otolithes *sagittae*) constitutive de l'oreille interne du poisson. Ces pièces sont formées 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 baryum (Ba), le calcium (Ca) et certains isotopes du Strontium (^{87}Sr , ^{86}Sr) sont incorporés chaque jour de la vie du poisson dans ces couches journalières. Les ratios de certains de ces éléments (Sr:Ca, Ba:Ca, $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr) ont la propriété d'évoluer en proportion avec le milieu de vie (Elsdon and Gillanders, 2004). Ils sont donc susceptibles de renseigner sur les milieux occupés par le poisson à différents stades de son développement, notamment sur le milieu d'origine (rivières ou lac d'origine, piscicultures) sous réserve de l'existence de compositions géochimiques contrastées entre les différents milieux fréquentés.

Cette approche a été récemment testée sur le saumon du bassin de l'Adour (Thèse Martin J., 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 piscicole (pisciculture de Cauterets dans les Hautes Pyrénées). La géochimie des otolithes a été également utilisée avec succès le brochet pour discriminer avec succès l'origine natale sur la base du rapport isotopique du strontium (Wolff et al., 2012 ; Rohtla et al., 2014) ou de plusieurs éléments trace (Engstedt et al., 2014).

La microchimie des otolithes présente *a priori* un fort intérêt pour le brochet du lac de Serre-Ponçon et la discrimination des deux origines (naturelle vs pisciculture). Son application est cependant conditionnée par l'existence de contrastes dans la composition géochimique des eaux entre les différents environnements occupés par cette espèce, ce qui est très probablement le cas entre les eaux du lac et celle des étangs de la Dombes, où sont produits les alevins destinés au rempoissonnement. L'isotopie du strontium ($^{87}\text{Sr}:$ ^{86}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, dans certains cas l'analyse élémentaire (Sr:Ca ; Ba:Ca) plus simple à mettre en œuvre, peut être suffisante. Dans d'autre cas, un couplage de l'isotopie du Sr ($^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr) et de rapports élémentaires (Sr:Ca ; Ba:Ca) est nécessaire pour obtenir une discrimination plus poussée des différents milieux de vie.

3 Principaux résultats de l'étude 2017-2018

La microchimie des otolithes s'est avérée un outil performant pour discriminer l'origine natale des brochets du lac de Serre-Ponçon (pisciculture vs reproduction naturelle). L'eau de la pisciculture de la Dombes et celle du lac de Serre-Ponçon se discriminent nettement sur la base du rapport 'Strontium / Calcium' ; cette discrimination nette a été confirmée dans les analyses d'otolithes.

Sur un échantillon de 23 brochets adultes analysés (prélevés en 2015 et 2016), **26%** (IC95% 12.5-46.4%) **des individus proviennent de la pisciculture et 74%** (IC95% : 53.6-87.5%) **de la reproduction naturelle**. L'incertitude sur ces deux contributions est due à la taille de l'échantillon. Augmenter significativement le nombre d'individus analysés permettrait de réduire cette incertitude.

Néanmoins, il apparaît qu'une part majoritaire des brochets du lac pourrait provenir de la reproduction naturelle et non de l'alevinage. Ce résultat questionne sur les sites et les périodes de reproduction dans le lac de Serre-Ponçon au vu de l'important marnage saisonnier.

D'autre part, les signatures enregistrées dans la zone centrale des otolithes des individus issus de reproduction naturelle suggèrent l'existence de zones de fraie caractérisées par des signatures en Sr/Ca relativement variables et plus fortes que celle du lac ; ceci pourrait être dû à un gradient de ce rapport dans le lac ou l'existence de zones géographiques particulières où se déroule la reproduction.

4 Objectifs de l'étude 2019-2020

Les objectifs sont les suivants :

1. Compléter les analyses microchimiques de brochets juvéniles issus de la pisciculture de la Dombes ;
2. Compléter l'échantillon de brochets adultes du lac de Serre-Ponçon analysés par la microchimie des otolithes (rapport 'Strontium / Calcium'). Déterminer les proportions relatives de brochets provenant de la pisciculture et de reproduction naturelle ;
3. Evaluer la variabilité chimiques (élémentaire et isotopique) spatiale de l'eau du lac de Serre-Ponçon et évaluer la possibilité de discriminer l'origine natale naturelle des brochets (petit lac d'Embrun / branche Durance / branche Ubaye).

5 Mode opératoire

5.1 Sites d'étude

Deux prélèvements d'eau avaient été réalisés le 30 avril 2015, au moment de l'alevinage en alevins de brochets, afin de vérifier que l'eau du lac de Serre-Ponçon (SERP 1) avait une signature chimique suffisamment différente de l'eau de la pisciculture de la Dombes (DOM 1) au moins pour un des quatre indicateurs suivants Sr:Ca ; Ba:Ca ; Sr:Ba et $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr . Ceci étant une condition impérative pour utiliser la microchimie de l'otolithe pour discriminer l'origine pisciculture ou sauvage des brochets

du lac. Après l'obtention des premiers résultats (Richard et al., 2018) un échantillonnage plus large a été réalisé en 2019 en différents points du lac de Serre-Ponçon (6 échantillons, Figure 2) afin d'identifier de possibles différences de signatures pouvant permettre de déterminer différentes zones de reproduction.

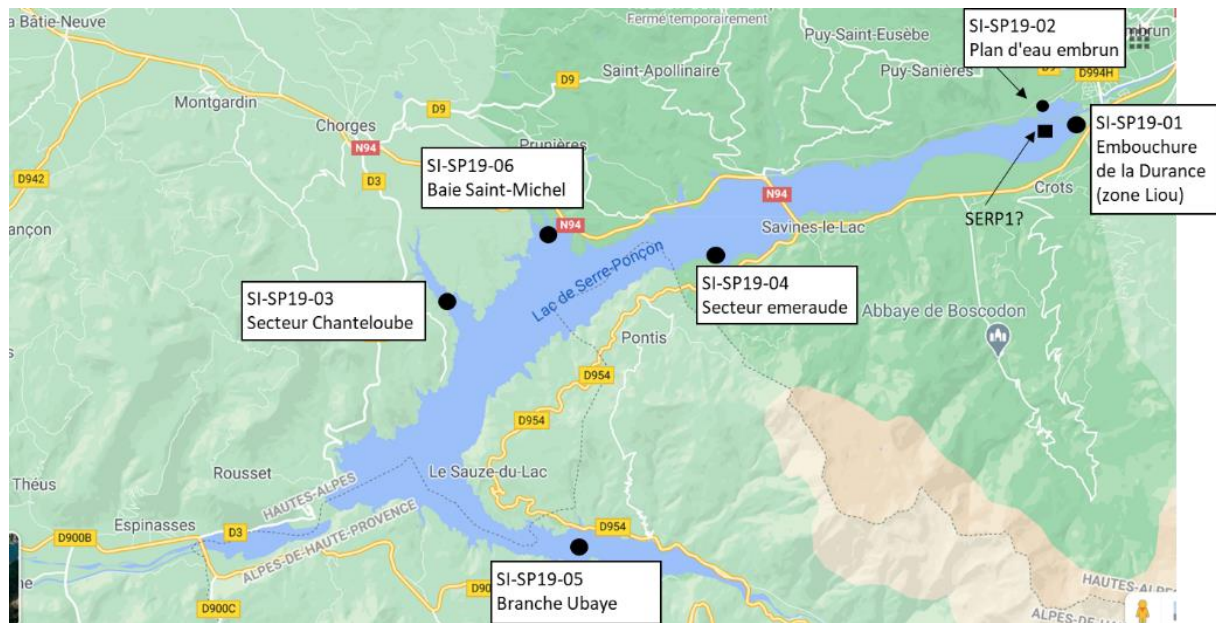


Figure 2 : localisation des prélèvements d'eau.

5.2 Collecte et préparation des échantillons d'eau

Les échantillons ont été collectés en respectant le protocole suivant (Figure 3) :

- Lavage préalable de l'ensemble du matériel utilisé avec de l'acide nitrique à 10%, afin d'éviter une éventuelle contamination des échantillons ;
- 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 ;
- Filtration de l'eau grâce à un filtre PVDF Whatmann fixé sur une seringue en polypropylène ;
- Acidification de l'échantillon avec 2mL d'acide nitrique (J.T. Baker, Ultrex) ;
- Stockage des échantillons d'eau au frais et à l'abri de la lumière jusqu'aux analyses.



Figure 3 : étapes du protocole de prélèvement d'eau.

5.3 Prélèvement des brochets et préparation des otolithes

Les brochets juvéniles issus de la pisciculture ont été prélevés au moment de leur mise à l'eau en 2019 (n=10). Les brochets adultes ont été prélevés grâce à la collaboration des pêcheurs amateurs au cours des saisons de pêche 2018 et 2019 (17 individus) ont été prélevés grâce à la collaboration de pêcheurs amateurs. Les têtes ont été conservées au congélateur, puis l'extraction des otolithes a été réalisée au laboratoire après avoir scalpé les têtes et retiré le cerveau (Figure 4).



Figure 4: Les différentes étapes d'extraction des otolithes (exemple du saumon)

Les otolithes ont ensuite été photographiés dans l'éthanol (Figure 5) puis inclus dans une résine Araldite 2020. Après 48h de séchage, les blocs de résine ont été coupés transversalement à proximité du nucléus à l'aide d'une scie circulaire de précision pour composites. Puis, ils ont été ponçés manuellement dans le plan transversal de l'otolithe jusqu'à obtenir une lame mince d'environ 1 mm d'épaisseur, dont un côté proche du nucléus (Figure 5). Le ponçage s'effectue à l'aide de disques de papier silice abrasifs humidifiés avec de l'eau MilliQ (18,2 Ω). Après ponçage, un polissage fin est réalisé à l'aide de poudre d'alumine Al_2O_3 pour éliminer les principales rayures, puis les lames minces sont séchées puis stockées en tubes Eppendorf.

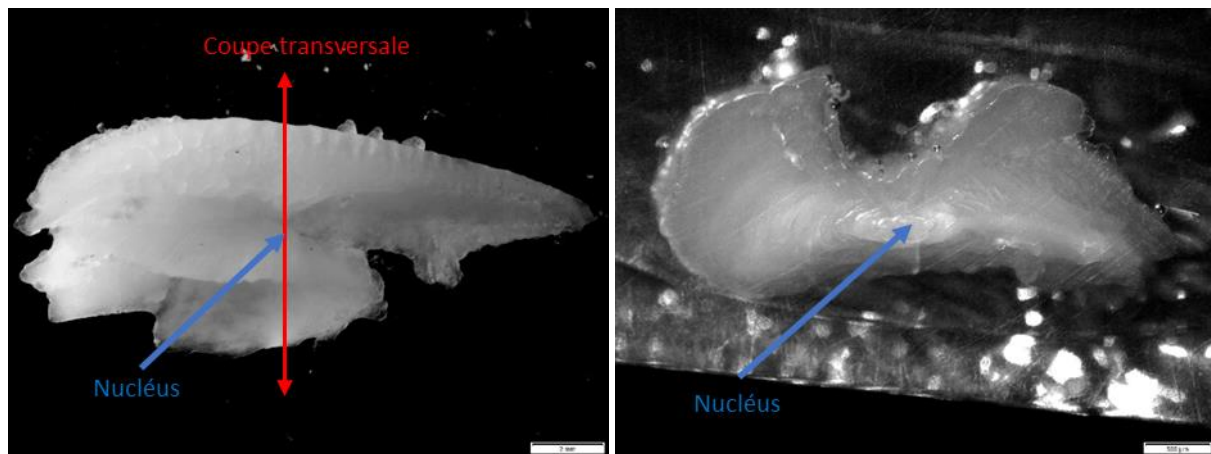


Figure 5 : Otolithe de brochet entier (à gauche) et en coupe transversale avant analyse géochimique (à droite)

5.4 Analyse élémentaire et isotopique du strontium

Analyse des eaux

La composition microchimique des eaux a été étudiée au niveau de 3 éléments chimiques : calcium (Ca), strontium (Sr) et baryum (Ba). Le rapport des isotopes stables du Sr ($^{87}Sr : ^{86}Sr$) a été

également analysé. 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}Sr : ^{86}Sr a été réalisée par spectrométrie de masse multicollection à plasma induit (MC-ICP-MS).

Analyse des otolithes

La composition géochimique des otolithes a été déterminée par ablation laser femtoseconde (Alafamet, Novalase, France) couplée à un spectromètre de masse à plasma induit (ICP-MS) pour le Sr, le Ba et le Ca. Les analyses ont été réalisées en continu sous la forme d'un transect initié entre 50 et 200 μM avant le nucleus selon si le nucleus était bien visible (50 μm avant) ou non (200 μm avant) afin d'être certain de passer par celui-ci à chaque fois. Les transects continus se composent d'une acquisition (mesure) toute les 1 s avec une vitesse d'avancé de 5 $\mu\text{m}/\text{s}$, soit un point tous les 5 μm .

Le profil de chaque individu a été observé et calé par rapport au nucleus (valeur 0 en abscisse). La zone correspondant à la période de vie en pisciculture ou dans le secteur de fraie lors d'une naissance dans le milieu naturel (lac ou zones connectées au lac) se situe dans la partie centrale de l'otolithe. Elle se compose d'une première partie sous influence maternelle (avant éclosion de l'œuf) suivie d'une partie correspondant au début de vie après l'éclosion puis la résorption du sac vitellin (alevin). La taille de cette zone centrale peut varier d'un individu à un autre en fonction de la vitesse de croissance de ceux-ci, mais aussi du temps que va passer l'alevin dans son secteur de naissance pour les individus nés en milieu naturel, secteur dans lequel l'alevin peut rester également une partie de sa vie juvénile. Un exemple de la zone centrale sélectionnée selon les individus est présenté sur la figure 6. Dans le cas des individus issus de la pisciculture des Dombes, cette zone peut varier de 100 (alevinage précoce) à 1100 μm (alevinage plus tardif) selon le temps passé dans la pisciculture de la Dombes. Dans le cas d'individus adultes, nous avons retenu en général la zone comprise entre 0 et 1200 μm . La portion du transect correspondant à la phase juvénile puis adulte (au-delà de la zone centrale) a été exclue car elle contient la signature du lac de Serre-Ponçon, pas forcément en relation avec le milieu de vie au stade alevin et juvénile.

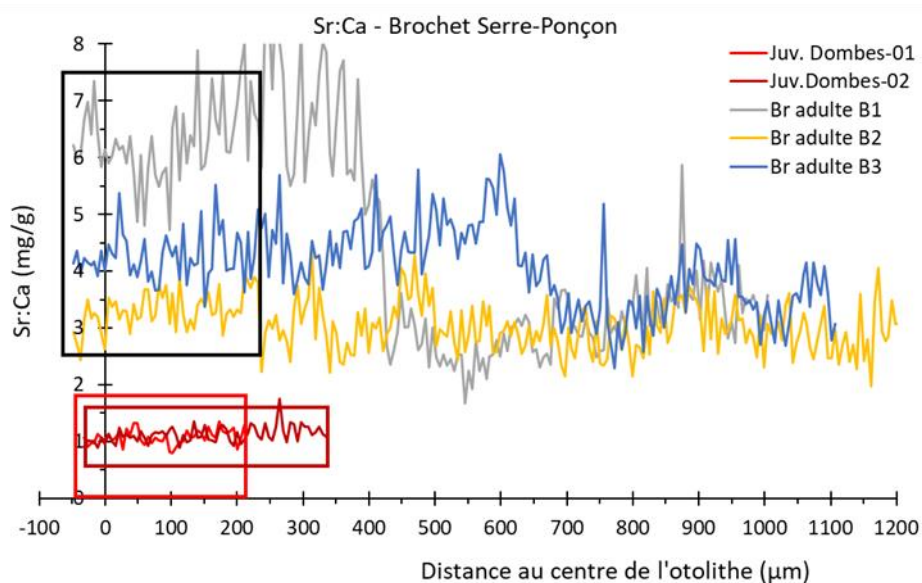


Figure 6: Exemples de profils du rapport Sr/Ca mesurés sur des otolithes de brochets de la pisciculture de la Dombes et sur des otolithes de brochets adultes (extrait de Richard et al, 2018).

6 Résultats et interprétation

6.1 Analyse de l'eau

Les résultats des analyses élémentaires (Sr, Ba, Ca) et du rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$) de l'eau montrent l'existence d'un écart important essentiellement au niveau du rapport Sr/Ca (Tableau 1 et 7) : ce rapport est 7 fois plus élevé dans le lac de Serre-Ponçon par rapport à la Dombes selon les données 2015 (Richard et al., 2018). Ce rapport présente également quelques différences entre certains sites échantillonnés autour du lac. En particulier, le plan d'eau Embrun se caractérise par une valeur du Sr/Ca plus élevée (17,8, site en vert dans le tableau 2) que celle rencontrée au niveau des 4 sites situés dans la partie aval du lac (moyenne de $13,4 \pm 0,24$, sites en bleu tableau 2). La zone de confluence de la Durance avec le lac (Liou) présente un rapport Sr/Ca intermédiaire (14,2) entre le plan d'eau Embrun et le lac aval.

Pour les autres paramètres analysés (Ba/Ca et $^{87}\text{Sr} : ^{86}\text{Sr}$) peu de différence significative sont enregistrées, que ce soit entre le lac et la pisciculture de la Dombes qu'entre les différents sites autour du lac (Figures 7 et 8), à l'exception du plan d'eau Embrun et la zone de confluence de la Durance caractérisés par un rapport Ba/Ca plus élevé. Seul le rapport Sr/Ba discrimine uniquement l'eau de la Dombes mais ceci est principalement lié au Sr/Ca, voir Figure 7 et 8.

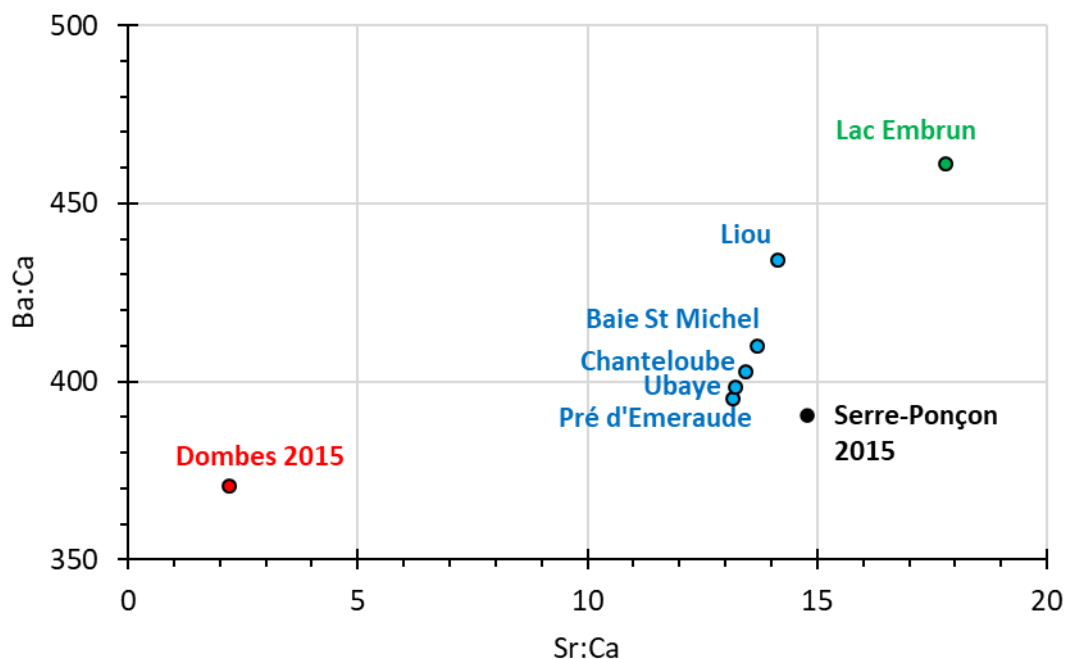


Figure 7 : Représentation des rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans les 6 prélèvements d'eau réalisés sur le lac de Serre-Ponçon en 2019 (en bleu et en vert) et dans les prélèvements d'eau réalisés en 2015

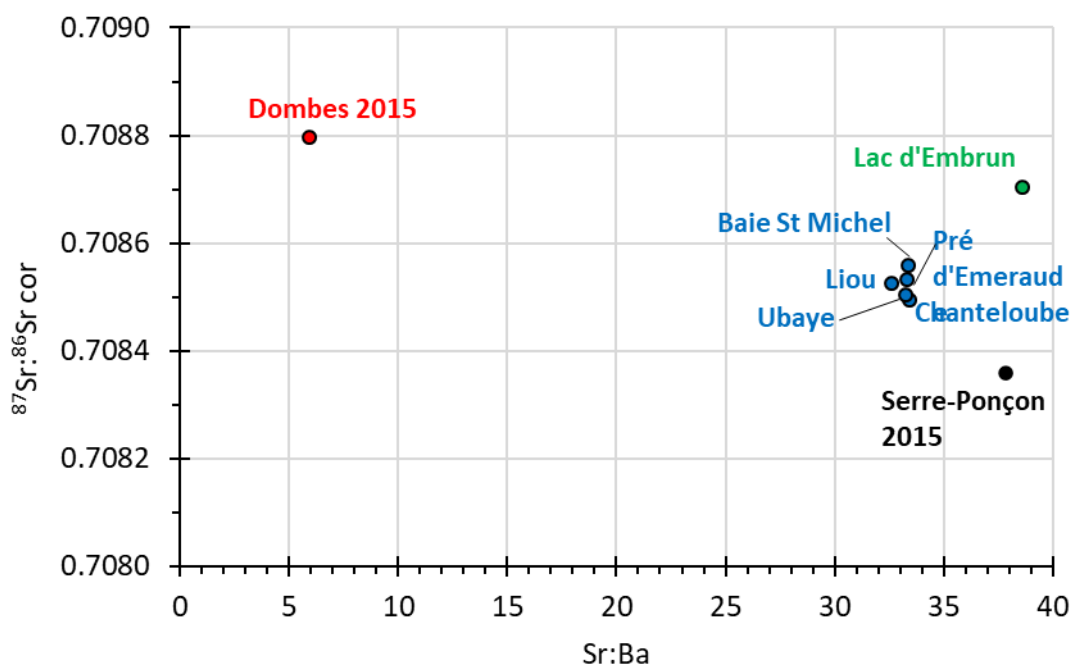


Figure 8 : Représentation des rapports Sr/Ba et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les 6 prélèvements d'eau réalisés sur le lac de Serre-Ponçon en 2019 (en bleu et en vert) et dans les prélèvements d'eau réalisés en 2015

Tableau 1: Résultats des analyses élémentaires et isotopiques des eaux prélevées en 2015 et 2019

River	Site	Sample	Date	Ca (mg/L)	Sr ($\mu\text{g/L}$)	Ba ($\mu\text{g/L}$)	Sr:Ca (mg/g)	Ba:Ca ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$
Dombes	Pisciculture	DOM 1	30/04/2015	55,0	1 029,8	20,4	2,2	371	0,70879
Serre-Ponçon	lac de Serre-Ponçon	SERP 1	30/04/2015	69,7	122,0	27,2	14,8	391	0,70836
Serre Ponçon Liou (zone amont lac)	embouchure Durance	SI-SP19-01	09/07/2019	55,1	779,6	23,9	14,15	434	0,708525
Plan d'eau embrun	droite embouchure Durance	SI-SP19-02	09/07/2019	37,2	662,9	17,2	17,82	461	0,708702
Serre Ponçon Chanteloube (zone aval lac)		SI-SP19-03	09/07/2019	53,9	725,2	21,7	13,47	403	0,708492
Serre Ponçon Emeraude		SI-SP19-04	09/07/2019	54,6	719,2	21,6	13,17	395	0,708532
Serre Ponçon Ubaye / cimetière	branche Ubaye	SI-SP19-05	09/07/2019	54,1	716,5	21,5	13,25	398	0,708503
Serre Ponçon Baie St-Michel		SI-SP19-06	09/07/2019	54,2	742,4	22,2	13,70	410	0,708557

Par conséquent, les investigations microchimiques sur les brochets adultes ont été focalisées exclusivement sur les analyses élémentaires. D'autre part, compte tenu d'un pouvoir discriminant insuffisant pour les rapports Ba/Ca et Sr/Ba, seul le rapport Sr/Ca a été exploité dans les otolithes d'adultes afin d'identifier l'origine pisciculture ou recrutement naturel, et explorer d'éventuelles différences au sein de la fraction naturelle.

L'eau du lac de Serre-Ponçon et celle de la Dombes se discriminent donc distinctement sur la base du rapport 'Sr / Ca', avec de surcroît un certain écart constaté pour le petit lac d'Embrun par rapport au lac de Serre-Ponçon. Les autres sites prélevés sur le lac de Serre-Ponçon présentent peu d'hétérogénéité dans les analyses chimiques.

En conséquence, seul le rapport 'Sr / Ca' a ensuite été analysé dans les otolithes juvéniles et adultes de brochets.

6.2 Analyse des otolithes

En 2015, 2 juvéniles issus de la pisciculture de la Dombes avaient été analysés. En 2019, sur une dizaine de juvéniles de pisciculture prélevés, 7 otolithes se sont avérés exploitables. Ainsi au total, 9 otolithes de juvéniles issus de la Dombes ont permis de caractériser la signature Sr/Ca propre à cette pisciculture.

Parallèlement, les otolithes de 17 brochets adultes capturés dans le lac de Serre-Ponçon 2019 ont pu être analysés et ajoutés à l'échantillon de 23 adultes précédemment analysé, soit un total de 40 brochets adultes analysés.

6.2.1 Comparaison des signatures microchimiques dans les otolithes

Afin de vérifier que les différences de signatures en Sr/Ca observées dans les eaux sont retrouvées dans les otolithes, nous avons comparé la signature Sr/Ca enregistrée dans les 9 juvéniles de la Dombes (Figure 9) avec celle du bord externe des otolithes des individus adultes pêchés dans le lac de Serre-Ponçon (Figure 10). Dans la mesure où les individus adultes ont été pêchés dans le lac, la signature enregistrée sur le bord externe de l'otolithe doit être le reflet de la chimie du lac en Sr/Ca.

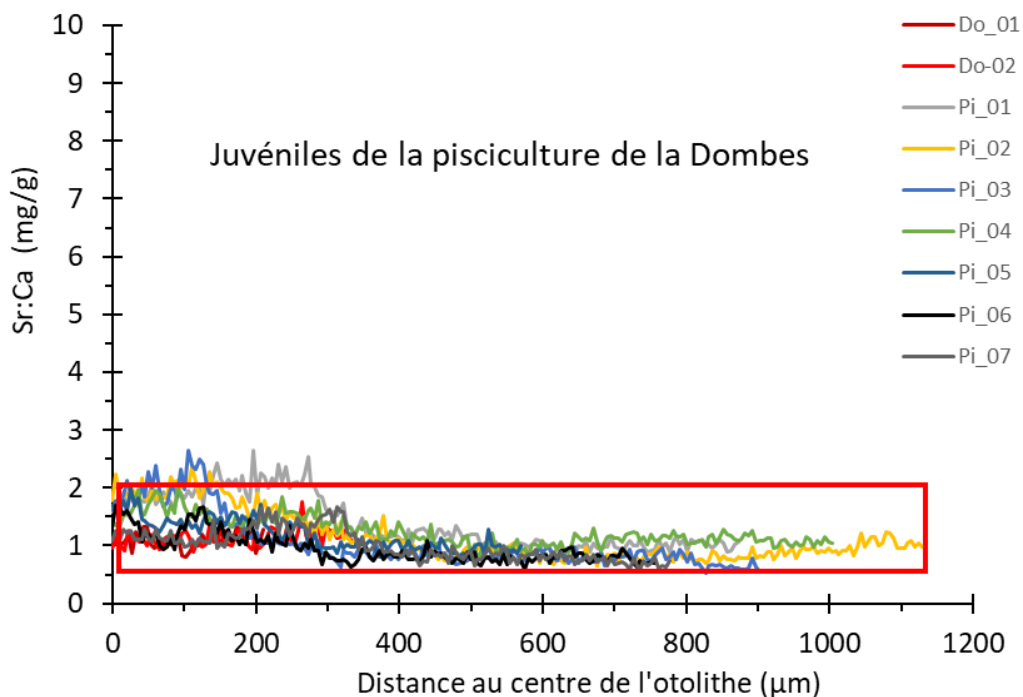


Figure 9 : Profils du rapport Sr/Ca mesuré sur les 9 otolithes de juvéniles de brochets de la pisciculture des Dombes.

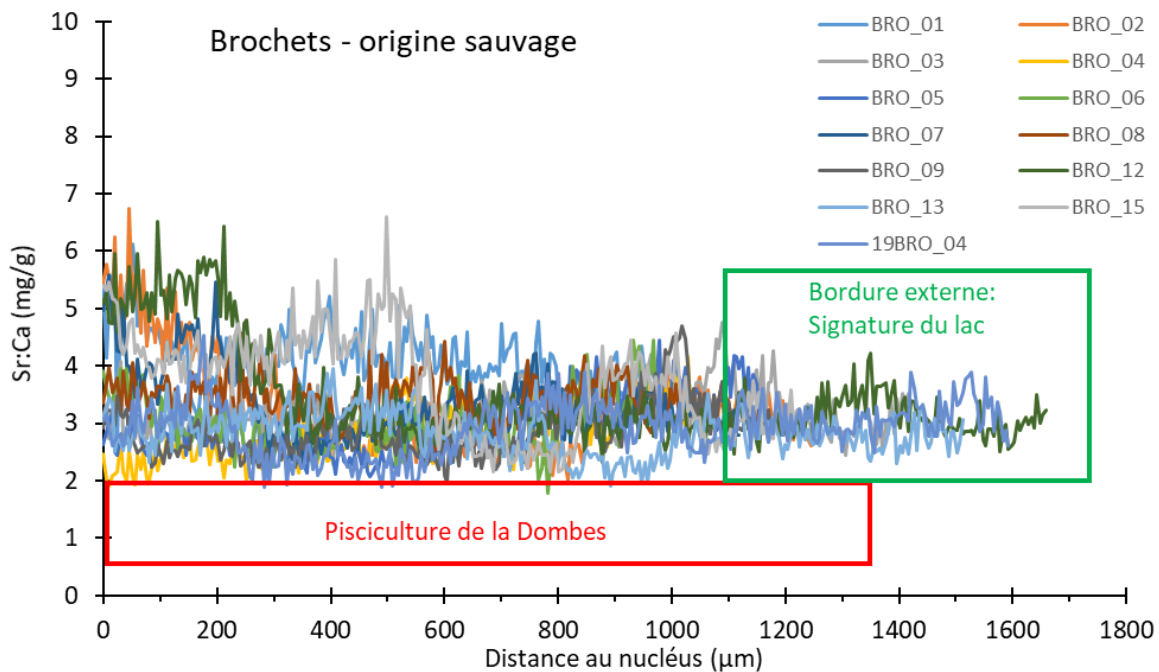


Figure 10 : Profils du rapport Sr/Ca mesuré sur les otolithes de 13 brochets adultes d'origine naturelle prélevés dans le lac de Serre-Ponçon en 2019.

Les résultats montrent que les otolithes ont correctement enregistré les différences observées dans les eaux (Figure 9 et Figure 10). **En effet, le ratio Sr/Ca est trois fois plus élevé dans la portion des otolithes correspondant au séjour des brochets dans le lac de Serre-Ponçon (3.07 ± 0.32 , min=2.35, max=5.94) par rapport aux brochets juvéniles de la Dombes (1.05 ± 0.23 , min=0.66, max=1.45).** La variabilité inter-individuelle de ce rapport dans les otolithes est relativement modérée pour les deux environnements (Lac et Dombes $\approx 10-20\%$). Il n'apparaît pas de recouvrement des signatures des deux origines, laissant peu de doute sur l'assignation des individus issus de la Dombes.

On observe davantage de variabilité du rapport Sr/Ca au cours de la phase juvénile : certains individus présentent des valeurs relativement élevées à cette période en comparaison à la signature typique du lac (observée sur la bordure externe des otolithes). Cette variabilité sera analysée plus en détail dans la partie 6.2.3.

6.2.2 Origine pisciculture ou reproduction naturelle des brochets capturés à Serre-Ponçon

Pour déterminer l'origine natale des brochets adultes, la signature moyenne de l'otolithe correspondant à la zone centrale a été déterminée (période de développement embryo-larvaire et juvénile : 0-1000µm).

A partir de la Figure 11, il apparaît que :

- **10 brochets adultes sont issus de repeuplement**
- **30 brochets adultes sont issus de reproduction naturelle dans des secteurs de fraie présentant une signature similaire au lac (15-17 individus) ou plus élevée (15-13).**

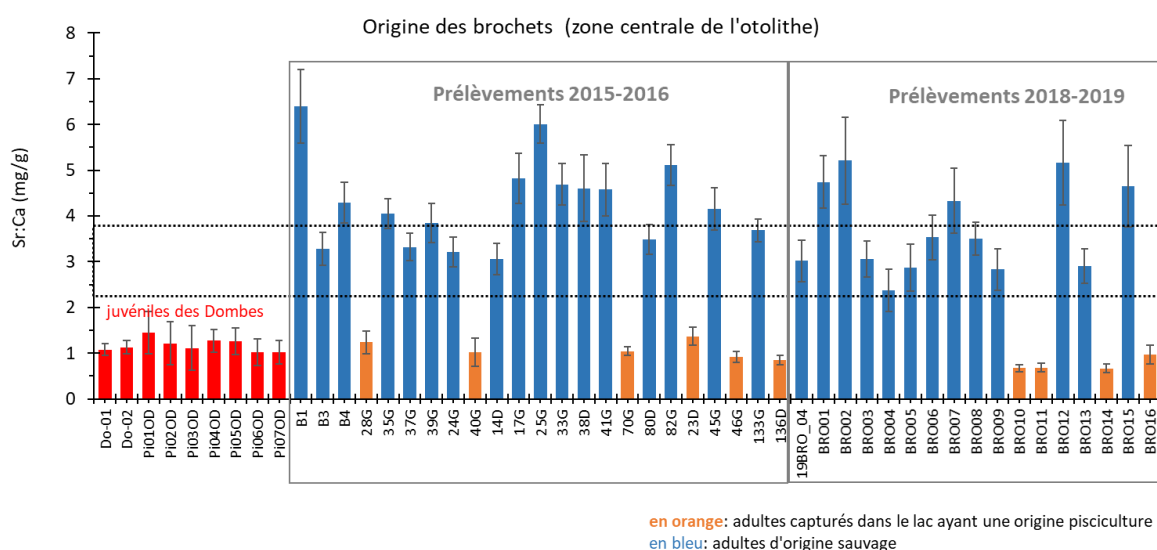


Figure 11: Valeur moyenne du ratio Sr/Ca (SD) mesuré dans la zone centrale de l'otolithe (période embryo-larvaire et juvénile) pour chacun des 49 brochets analysés (9 individus issus de la pisciculture de la Dombes ; 40 issus de Serre-Ponçon). Les 17 échantillons collectés en 2019 apparaissent à droite du graphique. Le rectangle en pointillé correspond à la signature du lac de Serre-Ponçon.

Au bilan, parmi les 40 brochets adultes analysés, deux groupes se distinguent en fonction de leur rapport Sr/Ca. 10 individus présentent un ratio Sr/Ca pendant la période embryo-larvaire et juvénile similaire à celui des juvéniles de la pisciculture de la Dombes, compris entre 0.7 et 1.4 mg/g (mean \pm SD = 1.1 \pm 0.2 mg/g). Les 30 autres individus présentent des valeurs comprises entre 2.4 et 6.4 mg/g (mean \pm SD = 4.02 \pm 0.99 mg/g), significativement plus élevées (t-test $p < 0.001$). Cet écart entre les deux groupes d'individus est suffisamment net pour qu'il n'y ait pas d'incertitude sur l'origine natale des 40 individus analysés.

Globalement, **75% des brochets adultes (intervalle de confiance de Wilson sans correction 59.8-85.8%)** sont issus de reproduction naturelle et **25% (intervalle de confiance 14.2-40.2%) de l'alevinage via la pisciculture de la Dombes** (Figure 12). La contribution de l'alevinage ne diffère pas significativement entre les deux périodes de prélèvements 2015-2016 (26%) et 2018-2019 (24% ; test exact de Fischer, $p=1$), ce qui confirme la robustesse de la première estimation.

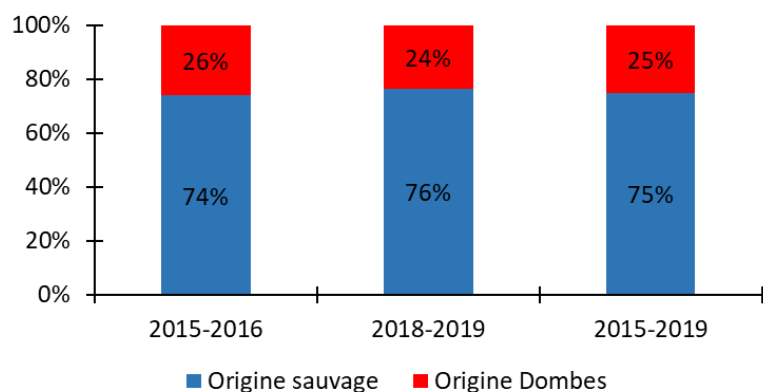


Figure 12 : Proportion de brochets adultes d'origine sauvage (naissance dans le lac de Serre-Ponçon ou ses connections) et d'origine pisciculture de la Dombes en fonction de deux périodes de captures (2015-2016 et 2018-2019)

6.2.3 Variabilité des origines naturelles

Les signatures microchimiques des brochets issus de recrutement naturel lors de leur phase juvénile (zone centrale de l'otolithe) sont très variables selon les individus [moyenne \pm SD = 4.02 ± 0.99 (25%) ; min= 2.37, max= 6.39], et sont en moyenne plus élevées que la signature moyenne de la zone externe de l'otolithe correspondant au lac (3.07 ± 0.32).

Les signatures juvéniles sont censées représenter la diversité des zones naturelles de fraie dans le lac ou ses connections. Cette variabilité témoigne probablement d'une diversité dans les zones de fraie, 50-56% des individus ayant un rapport Sr/Ca similaire au lac (≈ 3) alors que 44-50% ont des rapports plus élevés ($\approx 4-6$) comme en témoigne la Figure 11, dont deux individus présentant des signatures juvéniles supérieures à 6. **Les signatures juvéniles les plus élevées pourraient correspondre au plan d'eau d'Embrun. Sous cette hypothèse, la relation entre la signature de l'eau et des otolithes pour ce plan d'eau serait comparable à celle obtenue pour les autres sites (Figure).**

	Eaux		Otolithes de brochet		
	Sr:Ca (mg/g)	SD	Sr:Ca (mg/g)	SD	SD (%)
Dombes	2.22	0.33	1.05	0.23	22%
Plan d'eau embrun	17.82	-	6.20	0.27	4%
Serre-Ponçon (Lac)	13.40	0.24	3.07	0.32	10%

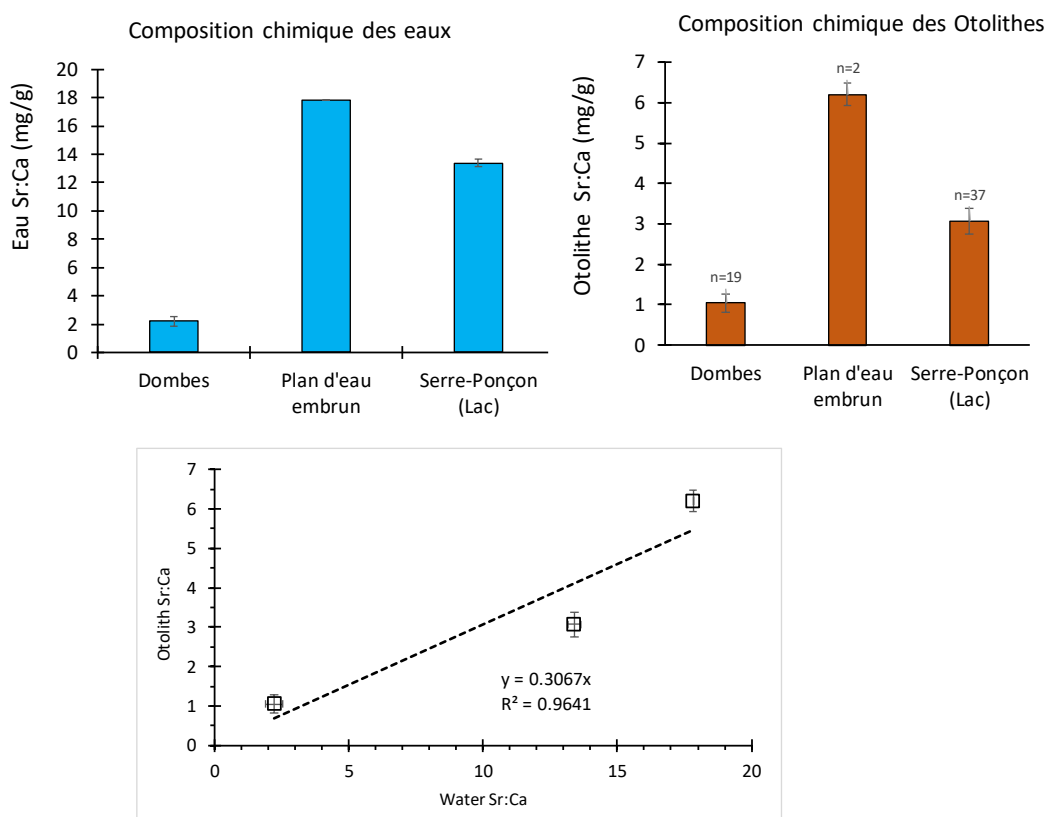


Figure 13: Comparaison du rapport Sr/Ca entre les prélèvements d'eau (Lac, plan d'eau Embrun et Dombes) et les otolithes (Dombes : alevins de la pisciculture ; lac : partie externe des otolithes d'adultes ; plan d'eau d'Embrun : parties juvéniles à fort rapport Sr/Ca chez 2 otolithes d'adultes).

Les signatures juvéniles élevées en Sr/Ca ($\approx 4-6$), entre celle du lac de Serre-Ponçon et le plan d'eau Embrun, pourraient, quant à elles, correspondre à la zone amont du lac dans le secteur proche de la confluence de la Durance et de la connexion avec le plan d'eau d'Embrun, mais cela resterait à confirmer.

La validation des hypothèses sur les origines natales naturelles et les contributions respectives de ces origines natales nécessiterait l'analyse de juvéniles provenant respectivement du petit lac d'Embrun et du lac de Serre-Ponçon (frayère du Liou et autre site de fraie).

7 Conclusions

La microchimie des otolithes est un outil performant pour discriminer l'origine natale des brochets du lac de Serre-Ponçon (pisciculture vs reproduction naturelle). L'eau de la pisciculture de la Dombes et celle du lac de Serre-Ponçon se discriminent nettement sur la base du rapport 'Strontium / Calcium'. Cette discrimination nette a été confirmée dans les analyses d'otolithes. Le pouvoir de discrimination est de 100%.

Sur l'échantillon total de brochets adultes analysés (n=40, dont 17 individus prélevés en 2018-2019), 25% (IC_{95%} 14.2-40.2%) des individus proviennent de la pisciculture et 75% (IC_{95%} 59.8-85.8%) de la reproduction naturelle. Bien qu'une incertitude demeure en raison de la taille de l'échantillon, la cohérence des récents résultats avec les analyses réalisées en 2015-2016 (Richard et al., 2018) confirme la robustesse de ces proportions et la part majoritaire de la reproduction naturelle dans le stock de brochet du lac de Serre-Ponçon. Ce résultat questionne sur les sites et les périodes de reproduction dans le lac de Serre-Ponçon au vu de l'important marnage saisonnier.

La variabilité des signatures en Sr/Ca enregistrées dans la zone centrale des otolithes des individus issus de reproduction naturelle suggère l'existence de différentes zones de fraies. Les prélèvements d'eau réalisés au niveau de 5 frayères potentielles du lac (Liou, Baie Saint Michel, Pré d'Emeraude, Chanteloube, Ubaye) ont toutefois montré des rapports microchimiques très similaires. Seul le Plan d'Eau d'embrun semble se démarquer du reste du lac au niveau du rapport 'Strontium / Calcium'.

Alors que la moitié des brochets présente une signature Sr/Ca similaire au lac (en période juvénile), l'autre moitié présente une signature plus forte. Ceci pourrait être dû à un gradient de ce rapport dans le lac (non identifié avec les prélèvements d'eau réalisés) ou l'existence de zones de reproduction particulières avec des signatures spécifiques. Même si l'échantillonnage des eaux reste trop restreint pour aboutir à une conclusion définitive, il semble que le plan d'eau Embrun et la zone amont du lac (secteur de la confluence avec la Durance) constitueraient des zones avec une signature Sr/Ca plus élevée que le lac (Figure 6). Il convient néanmoins d'être prudent car les résultats d'analyse des eaux ne reflètent pas forcément la variabilité saisonnière du système. Pour cela, des analyses d'otolithes de juvéniles provenant de plusieurs sites du lac et du plan d'eau d'Embrun seraient pertinentes.

8 Bibliographie

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.

Engstedt, O., Engkvist, R. & Larsson, P. 2014. Elemental fingerprinting in otoliths reveals natal homing of anadromous Baltic Sea pike (*Esox lucius* L.). *Ecology of Freshwater Fish* 23 : 313-321.

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.

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.

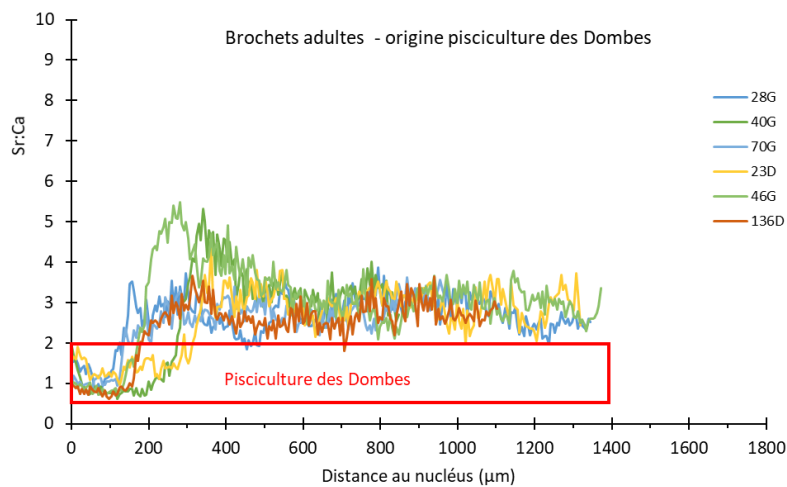
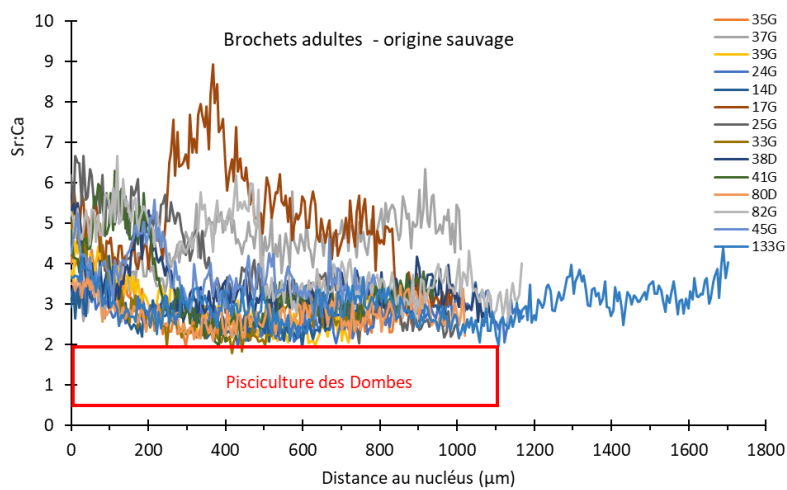
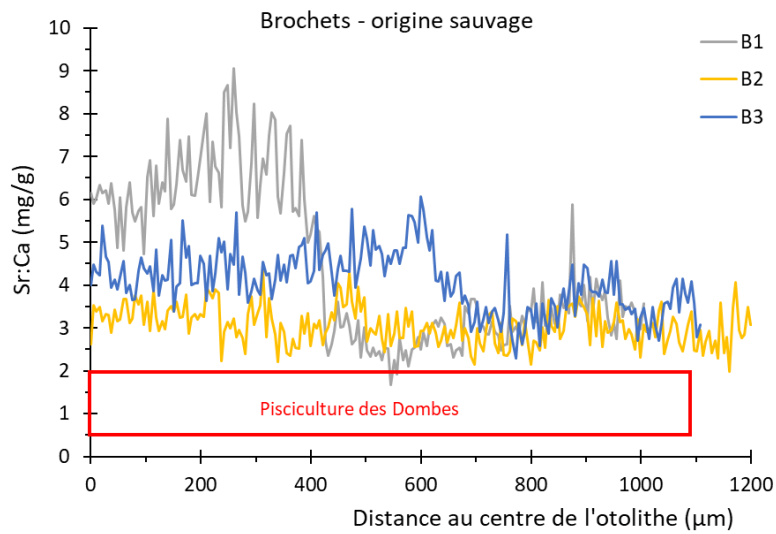
Martin J., G. Bareille, S. Berail, F. Daverat, C. Pécheyran, N. Bru, H. Tabouret, O.F.X. Donard, 2013. Spatial and temporal variations in otolith chemistry and relationships with water chemistry: a useful tool to distinguish Atlantic salmon parr from different natal streams. *Journal of Fish Biology* 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.

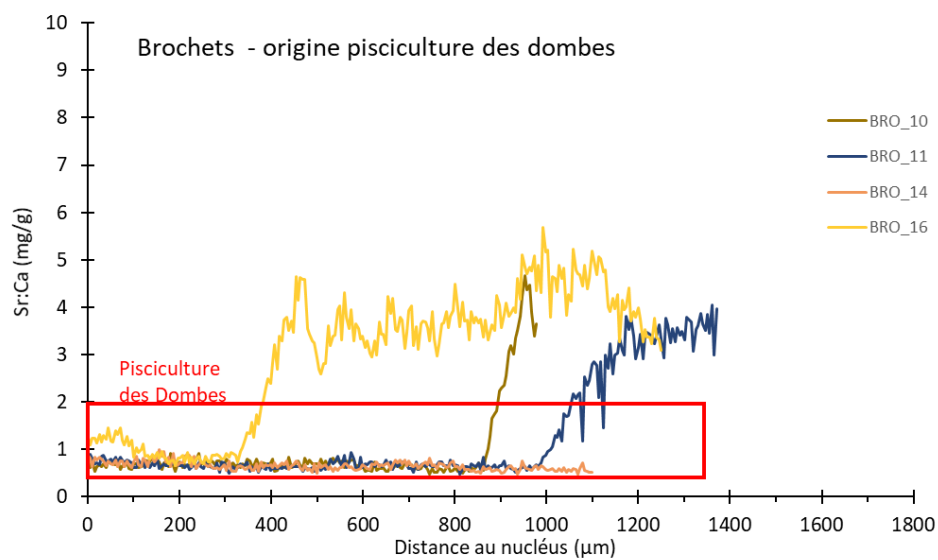
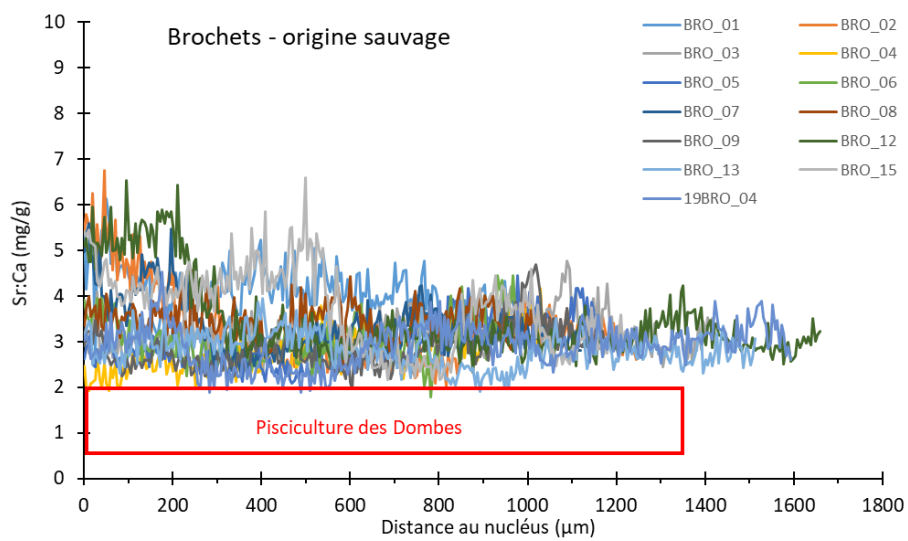
Richard A, Caudron A., Bareille G. 2018. Evaluation de la contribution du repeuplement dans le stock de brochets du lac de Serre-Ponçon par la composition géochimique des otolithes. Note technique. 12p.

Rohtla, M., Vetemaa, M., Svirgsden, R., Taal, I., Saks, L., Kesler, M., Verliin, A. & Saat, T. 2014: Using otolith $^{87}\text{Sr}:\text{86Sr}$ as a natal chemical tag in the progeny of anadromous Baltic Sea pike (*Esox lucius*) — pilot study. *Boreal Env. Res.* 19: 379–386.

Annexe : Evolution temporelle du Sr/Ca dans les otolithes des 40 brochets analysés lors de cette étude.



Profils Sr/Ca des 23 brochets adultes prélevés en 2015 et 2016



Profils Sr/Ca des brochets adultes prélevés en 2018 et 2019. En haut : brochets d'origine sauvage. En bas : brochets issus de la pisciculture de la Dombes