



HAL
open science

**2023. Etude de la Connectivité des populations de
Truite fario dans le bassin amont de la Rhue via la
chimie de leurs Otolithes (ECTRO) Phase 1 : évaluation
de la composition chimiques des eaux de la Rhue et de
ses affluents**

Gilles Bareille, Pascale Louvat, Romain Max

► **To cite this version:**

Gilles Bareille, Pascale Louvat, Romain Max. 2023. Etude de la Connectivité des populations de Truite fario dans le bassin amont de la Rhue via la chimie de leurs Otolithes (ECTRO) Phase 1 : évaluation de la composition chimiques des eaux de la Rhue et de ses affluents. IPREM UMR5254 CNRS/UPPA - Institut des Sciences analytiques et de physico-chimie pour l'Environnement et les matériaux; Fédération Départementale des Associations Agréées de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique du Cantal. 2023. hal-04449747

HAL Id: hal-04449747

<https://univ-pau.hal.science/hal-04449747>

Submitted on 9 Feb 2024

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.



- IPREM – Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les matériaux – UMR 5254 UPPA/CNRS – Université de Pau et des Pays de l'Adour Laboratoire de Chimie Analytique Bio Inorganique et Environnement (LCABIE) Hélioparc - 2 avenue du Président Angot – 64053 PAU Cedex 9
- Fédération du Cantal pour la Pêche et la protection du Milieu Aquatique - 14 allée du Vialenc, 15000 AURILLAC.

Etude de la Connectivité des populations de Truite fario dans le bassin amont de la Rhue via la chimie de leurs Otolithes (ECTRO)

Phase 1 : évaluation de la composition chimiques des eaux de la Rhue et de ses affluents



Auteurs :

Gilles Bareille, IPREM UMR 5254, 05.59.40.77.61/ 06 87 97 39 83, gilles.bareille@univ-pau.fr

Pascale Louvat, IPREM UMR5254, pascale.louvat@univ-pau.fr

Romain MAX, Responsable technique de la Fédération du Cantal pour la Pêche et la protection du Milieu Aquatique, fedepeche15.maxromain@orange.fr

Citer ce document : Bareille G., Max R., Louvat P., 2023. Projet ECTRO - Etude de la connectivité des populations de truite fario dans le bassin amont de la Rhue via la chimie de leurs otolithes : phase 1, évaluation de la composition chimique des eaux de la Rhue et de ses affluents. 34p.



SOMMAIRE

1. Contexte général.....	4
2. Comment évaluer la connectivité des populations de truites dans le bassin de la Rhue : principes de la géochimie des otolithes.....	5
3. Objectifs de l'étude de faisabilité	7
4. Prélèvements et analyses.....	8
4.1. Présentation des sites d'échantillonnage.....	8
4.2. Collecte et préparation des échantillons d'eaux	11
4.3 Analyses chimiques.....	12
5. Résultats - Interprétations	14
5.1. Mesures physico-chimiques	14
5.2. Analyses élémentaires et isotopie du Sr - potentiel de discrimination Rhue - affluents.....	17
5.3. Discussion sur les analyses isotopiques.....	25
6. RESUME.....	27
7. Références.....	27
8. Annexes.....	30

Liste des figures

Figure 1 : carte du bassin de la Rhue avec ses affluents principaux.	9
Figure 2: carte de localisation des 35 échantillons d'eaux prélevés dans le bassin de la Rhue en juin 2022.....	11
Figure 3: étapes du protocole de prélèvement d'eau et de traitement des eaux sur le terrain.	12
Figure 4 : carte géologique simplifiée du bassin de la Rhue ; Bleu : roches volcaniques ; rose clair : roches métamorphiques ; rose foncé : granites ; vert : alluvions quaternaires.	15
Figure 5a : distribution aval (Gauche) – amont (droite) des rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans les eaux de la Rhue et ses affluents, ainsi que dans la Couze Pavin. Les histogrammes en bleu foncé représentent les échantillons de l'axe de la Rhue. Ceux en couleur les affluents et la Couze Pavin.....	18
Figure 5b : distribution aval (Gauche) – amont (droite) du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les eaux de la Rhue et ses affluents, ainsi que dans la Couze Pavin. Les histogrammes en bleu foncé représentent les échantillons de l'axe de la Rhue. Ceux en couleur représentent les affluents et la Couze Pavin.....	19



Figure 6a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents.	20
Figure 6b : Sr/Ca en fonction du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les eaux de la Rhue et de ses affluents.	20
Figure 7 : présentation des 3 secteurs définis et affluents localisés dans ceux-ci.	21
Figure 8a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 1 (aval Vaussaire).	22
Figure 8b : Sr/Ca en fonction du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 1 (aval Vaussaire).	22
Figure 9a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 2 : Vaussaire - Essarts.	23
Figure 9b : Sr/Ca en fonction du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 2 : Vaussaire - Essarts.	23
Figure 10a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 3 : amont Essarts.	25
Figure 10b : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 3 : amont Essarts.	25

Liste des tableaux

Tableau 1: rapports Sr/Ca, Ba/Ca et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ déterminés suite aux analyses chimiques réalisées sur les eaux du bassin de la Rhue. Mesures de conductivité effectuées sur le terrain.....	16
---	----

Liste des annexes

Annexe 1: liste et localisation des échantillons d'eaux prélevés du 20/06 au 24/06/2022. Données des paramètres physico-chimiques (T°C, pH, conductivité).	30
Annexe 2: Concentrations en Ba ($\mu\text{g/L}$), Ca (mg/L), Sr ($\mu\text{g/L}$), K (mg/L), Mg (mg/L), Mn ($\mu\text{g/L}$) et Na (mg/L) dans les échantillons d'eaux prélevés dans la Rhue et ses affluents en juin 2022.	31
Annexe 3: distribution des éléments Potassium (K), Magnésium (Mg) et Sodium (Na) dans la Rhue (bleu foncé) et ses affluents (couleurs)	32
Annexe 4 : distribution spatiale amont-aval sous forme de carte schématique des marqueurs d'habitat Sr/Ca, Ba/Ca et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.	33



1. Contexte général

Dans le contexte du changement global et de ses effets sur les occupants des milieux aquatiques, il apparaît essentiel d'obtenir des informations sur les patrons de migrations des espèces piscicoles, celles-ci subissant bien souvent de nombreuses pressions anthropiques et hydro-climatiques défavorables. Les déplacements constituent en effet un facteur essentiel pour le poisson que ce soit pour trouver un environnement favorable à chaque stade de son développement ou pour permettre la résilience d'un milieu soumis à des événements extrêmes (crues dévastatrices, épisodes de sécheresse). Parmi celles-ci, la truite commune *Salmo trutta* est particulièrement concernée car elle occupe des bassins largement anthropisés par les activités humaines (production hydroélectrique, pompage d'eau pour l'irrigation, rejets de polluants, dégradation des habitats, etc). Cependant, il existe à ce jour peu d'information sur les patrons de migration de cette espèce, en particuliers dans les zones continentales amont. Les informations obtenues l'ont été via des observations indirectes (captures) ou via des suivis via marquage passif ou actif. Cependant, ces méthodes montrent de nombreuses limites (précision de l'information spatiale, nombre de poissons suivis...). La truite commune occupe des bassins versants structurés de manière dendritique, très hétérogènes à des échelles fines en termes de pente, de température, de débit, et d'obstacles. De ce fait, les populations de truite commune peuvent présenter des patrons de connectivité relativement différents même à des échelles micro-géographiques, par exemple entre le cours d'eau principal et des affluents majeurs ou des ruisseaux de petites tailles.

La connectivité entre les différentes composantes du bassin versant est un facteur clé dans le façonnage et le renouvellement des populations. En effet, la truite commune utilise des habitats différents selon son stade de vie : généralement, la fraie a lieu dans les têtes de bassin et les affluents, qui constituent aussi les nurseries pour les juvéniles après l'éclosion, alors que les cours d'eau principaux sont en général utilisés par les poissons plus âgés pour leur croissance (Jonsson, 1985). La connectivité entre les têtes de bassins, qui servent donc d'habitat pour la reproduction et de populations sources potentielles, et le cours d'eau principal est donc un facteur d'une importance capitale.

Outre sa valeur patrimoniale, la truite présente un enjeu socio-économique majeur en raison de sa place de choix au niveau de la pêche récréative. Cet enjeu devient de plus en plus important en raison d'une évolution à la baisse des stocks de truites au cours des dernières décennies.



Aussi, il semble aujourd'hui primordial d'évaluer les niveaux de connectivité entre le cours d'eau principal et ses affluents de divers ordres si l'on veut pouvoir mettre en place une gestion appropriée permettant de préserver voire d'améliorer le renouvellement de cette ressource dans le contexte des perturbations anthropiques et climatique actuel.

Le bassin versant de la Rhue qui s'écoule dans le Cantal est colonisée par la truite fario. Ses affluents abritent des populations présentant des dynamiques variables mais globalement préservées, ce qui n'est pas le cas de l'axe principal de la Grande Rhue. Ce dernier est relativement fragmenté en raison d'activités hydroélectriques et de verrous morphologiques (cascades). On y trouve des truites de taille importante mais peu de truitelles pouvant suggérer que les conditions de reproduction n'y seraient pas optimales. Une question fondamentale en découlant est l'origine des truites présentes dans l'axe de la Rhue : s'agit-il de reproduction in situ ou l'alimentation par certains de ses affluents colonisés par des populations abondantes ?

L'objectif principal de l'étude est donc d'évaluer la connectivité de la truite fario entre le cours principal de la Rhue et ses affluents.

2. Comment évaluer la connectivité des populations de truites dans le bassin de la Rhue : principes de la géochimie des otolithes

Il existe cependant peu de moyens rapides et peu onéreux permettant d'évaluer aisément cette connectivité. La méthode du marquage est difficile à mettre en œuvre sur des populations naturelles et nécessiterait un travail de terrain considérable.

Une nouvelle approche a émergé il y a une quinzaine d'année mais ne se développe que depuis seulement quelques années en milieu continental, il s'agit de la microchimie des otolithes. Les otolithes, ou pierre d'oreille du poisson, présente deux caractéristiques utiles pouvant permettre d'évaluer l'histoire de vie de la truite, et en particulier ses déplacements entre affluents et cours principal d'une rivière. En effet, cette pièce calcifiée, se forme par le dépôt journalier de couches de carbonate de calcium/protéines tout au long de la vie du poisson, ce qui permet d'accéder à la chronologie de vie.



D'autre part, des éléments chimiques sont incorporés chaque jour de la vie du poisson dans ces couches en proportion avec la composition chimique du milieu de vie (Elsdon and Gillanders, 2004 ; Martin et al., 2013a).

Le poisson enregistre donc dans sa paire d'otolithes (droit et gauche) des éléments chimiques, dont certains peuvent être accumulés en étroite relation avec la composition chimique de leur rivière de vie. Cette caractéristique permet alors de reconstituer les habitats occupés par le poisson au cours de sa vie, si ces environnements présentent des compositions chimiques contrastées. Parmi les éléments utiles pour déterminer les milieux de vie occupés par le poisson, on peut citer les éléments strontium (Sr) et baryum (Ba) et le rapport des deux isotopes du strontium (^{87}Sr et ^{86}Sr) (Elsdon and Gillanders, 2004 ; Martin et al., 2013).

La composition chimique des rivières dépend de la diversité géologique et de l'âge des roches des bassins-versants traversés. Ces compositions peuvent aisément présenter des variations marquées d'un bassin-versant à un autre, ainsi que d'un affluent à un autre.

Au sein de l'IPREM nous avons développé depuis 2006 l'analyse microchimique élémentaire (Sr/Ca, Ba/Ca, Sr/Ba) et isotopique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) dans des otolithes de diverses espèces de poissons pour évaluer des déplacements en milieux continentaux anthropisés afin d'évaluer le fonctionnement de populations à fine échelle spatiale. Sur la base de la microchimie élémentaire (Sr/Ca, Ba/Ca, Sr/Ba), nous avons pu ainsi démontrer récemment que la population de jeunes chevesnes dans une partie du Rhône anthropisé provenait largement de ses affluents Lône et Ardèche (Bouquet et al., 2021), suggérant le rôle essentiel de la connectivité Rhône/affluents. En système tropical, nous avons par contre démontré que les déplacements de gobies juvéniles étaient assez limités dès lors qu'ils avaient rejoint leur site de grossissement et, lorsque des déplacements sont avérés ils sont liés à des effets de compétition entre individus ou à l'influence d'évènements cycloniques (Teichet et al., 2018).

En combinant microchimie élémentaire et l'isotopie du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), nous avons développés des modèles d'assignation d'origines pour le Saumon (Martin et al., 2013a,b ; Bareille et al., 2017), la grande Alose du Golfe de Gascogne (Martin et al., 2015 ; Nachon et al., 2019) et la truite lacustre des grands lacs alpins (Richard et al., 2019). Ces modèles ont permis entre autres d'identifier les rivières-frayères conduisant au renouvellement des populations de ces migrateurs et d'évaluer le degré de connectivité à des échelles spatiales variables.



Enfin, en utilisant uniquement l'isotopie du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) nous avons évalué la résilience de la population de truite fario post-crue dévastatrice centennale de juin 2013 dans le bassin de la Garonne et son affluent la Pique (Bareille et al., 2017). Ces travaux ont permis de mettre en évidence : premièrement, un grand contraste dans le rôle du soutien aux effectifs dans la résilience post-crue selon les secteurs (Garonne aval >70%), Garonne amont (<10%) et la Pique (<10%). Les résultats obtenus pourraient témoigner de différences importantes dans la survie des individus issus de pisciculture en présence de la souche sauvage et donc de phénomènes de compétition. Deuxièmement, que la résilience rapide de la Pique (en 2 ans) par de la reproduction naturelle provenait en grande majorité (72%) d'individus nés pendant l'automne suivant la crue dans les affluents de petites tailles situés de part et d'autre de l'axe de la Pique aval, soulignant l'importance écologique de petits ruisseaux en réponse à un évènement hydrologique catastrophique.

L'utilisation de la composition chimique des otolithes est donc susceptible de renseigner sur les milieux occupés par un poisson à différents stades de son développement (rivières spécifiques ou bassin de développement, piscicultures) et donc d'aborder des questions relatives à la connectivité des populations, l'efficacité d'actions de gestion (repeuplements) et la résilience post-événements extrêmes. Il est donc envisageable d'utiliser cette technique dans le bassin de la Rhue.

Cependant, le succès de son application repose très largement **sur l'existence de contrastes géochimiques entre les environnements de vie susceptibles d'être occupés par la truite commune** *Salmo trutta* (axe principal de la Rhue et ses affluents). C'était le cas dans le bassin amont de la Garonne. Mais qu'en est-il dans le bassin de la Rhue ?

Il était donc indispensable de passer par une première étape de faisabilité avant de se lancer dans l'examen des otolithes de truite.

3. Objectifs de l'étude de faisabilité

L'objectif de cette première étape du projet ECTRO était donc de vérifier qu'il existe suffisamment de contrastes chimiques vis-à-vis des marqueurs Sr/Ca, Ba/Ca et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre l'axe principal de la Rhue et ses principaux affluents susceptibles de l'alimenter en truites fario.



Il a donc été proposé de faire un état zéro de la distribution géographique dans le bassin de la Rhue des trois marqueurs chimiques cités ci-avant sur la base d'une campagne de prélèvement d'eau en condition de débit d'étiage (Juin-août). Cela devrait permettre de préciser si l'ensemble des affluents de la Rhue sont chimiquement différenciés de la Rhue, ou lesquels dans le cas où certains s'avèreraient non différenciables. En fonction de ces résultats, alors il sera possible de proposer l'étude des otolithes sur l'ensemble du bassin ou seulement sur certaines zones.

Pour information, si la distribution géographique des signatures chimiques présente un fort potentiel permettant d'envisager de pouvoir répondre à la question de la connectivité, alors le projet rentrerait dans la deuxième phase :

- *Caractérisation de la variabilité temporelle (annuelle ou pluri-annuelle) des signatures chimiques enregistrées par les otolithes de jeunes truites de chaque affluent chimiquement différencié de l'axe de la Rhue (truites sédentaires de 2 ans ou plus). En complément, il sera envisagé d'évaluer l'évolution temporelle (saisonnnière) de la signature chimique de l'axe principal de la Rhue, via par l'analyse d'otolithes de poissons sédentaires (chabot par exemple, si autorisation de prélèvements) le long de son axe (amont-aval).*
- *Analyse de l'évolution de la composition chimique des otolithes de truites adultes prélevées dans l'axe principal de la Rhue afin d'évaluer la proportion d'individus résidents permanents de celle des individus nés dans les affluents de la Rhue afin de proposer un schéma de fonctionnement du renouvellement de la population de truite dans la Rhue.*

4. Prélèvements et analyses

4.1. Présentation des sites d'échantillonnage

La Rhue est une rivière d'environ 56 km de long avec un bassin versant de 900 km², située dans le Massif Central. C'est un affluent de la Dordogne en rive gauche. La Rhue prend sa source au cœur du parc naturel des volcans d'Auvergne où elle est appelée ruisseau de Clamouze (ou de Clamousse) et ruisseau d'Entraigues, avant de prendre le nom de Grande Rhue au sud d'Égliseneuve-d'Entraigues.



Ces principaux affluents (*figure 1*) depuis l'amont vers l'aval sont en rive droite, le Gabacut, le Taurons et la Tarentaine et en rive gauche, le Loubinoux, le Bonjon, la Santoire, la Petite Rhue. A Coindre, la Grande Rhue reçoit les eaux de la Petite Rhue, et devient la Rhue. Deux ouvrages hydrauliques ont été aménagés sur le cours de la Rhue, le premier en aval de Condat le barrage des Essarts d'une hauteur de 46 m, et le second en aval d'Embort le barrage de Vaussaire d'une hauteur de 32 m. La retenue du barrage de Vaussaire est alimentée en partie par une conduite forcée en provenance du lac de Lastiouilles. L'eau de cette retenue est amenée jusqu'à la centrale de la Rhue au niveau du barrage de Bort-les-Orgues.

Dans la partie amont, la grande Rhue, la Petite Rhue et la Santoire s'écoule sur des substrats volcaniques, vastes plateaux basaltiques (chaîne du Sancy, monts du Cantal, ...). Dans la partie moyenne et aval, la Rhue et certains de ces affluents s'écoulent sur un socle cristallin, métamorphique gneissique.

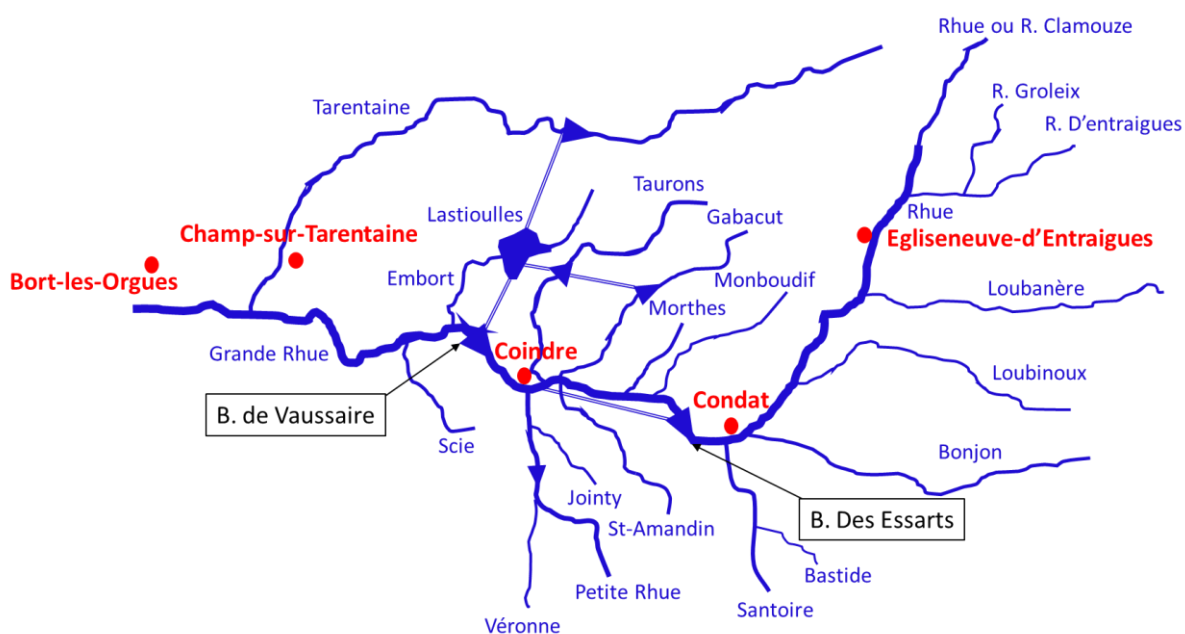


Figure 1 : carte du bassin de la Rhue avec ses affluents principaux.

Tous les affluents principaux de la Rhue, ainsi que quelques affluents de plus petites tailles, ont été échantillonnés (*figure 2*) :



-
- Rd : Gabacut, Taurons, Tarentaine, ruisseaux d'Embort, de la Morthe, de Montboudif;
 - Rg : Loubinoux, Bonjon, Santoire, Petite Rhue, Ruisseaux Loubanère, de la Scie et de Saint-Amandin;
 - Des affluents de la Petite Rhue (Véronne, ruisseau de Jointy) et de la Santoire (ruisseau de la Bastide) ont également été échantillonnés.
-
- Les différents cours d'eau concourant à la Grande Rhue (Clamouze, Groleix et Entraigues), ainsi que plusieurs sites de la Rhue le long de son cours ont été prélevés en amont et en aval de la confluence d'affluents en général.
 - Pour finir, la Couze Pavin alimentant la pisciculture utilisée pour des alevinages a également fait l'objet d'un prélèvement d'eau.

Le détail des sites de prélèvements d'eaux est présenté en annexe 1, avec les données des mesures physico-chimiques (Température, Conductivité, pH). La localisation des prélèvements d'eaux est présentée sur la figure 2.

ETUDE DE LA CONNECTIVITE DES POPULATIONS DE TRUITE COMMUNE DU BASSIN DE LA RHUE PAR GEOCHIMIE DES OTOLITHES
LOCALISATION DES STATIONS

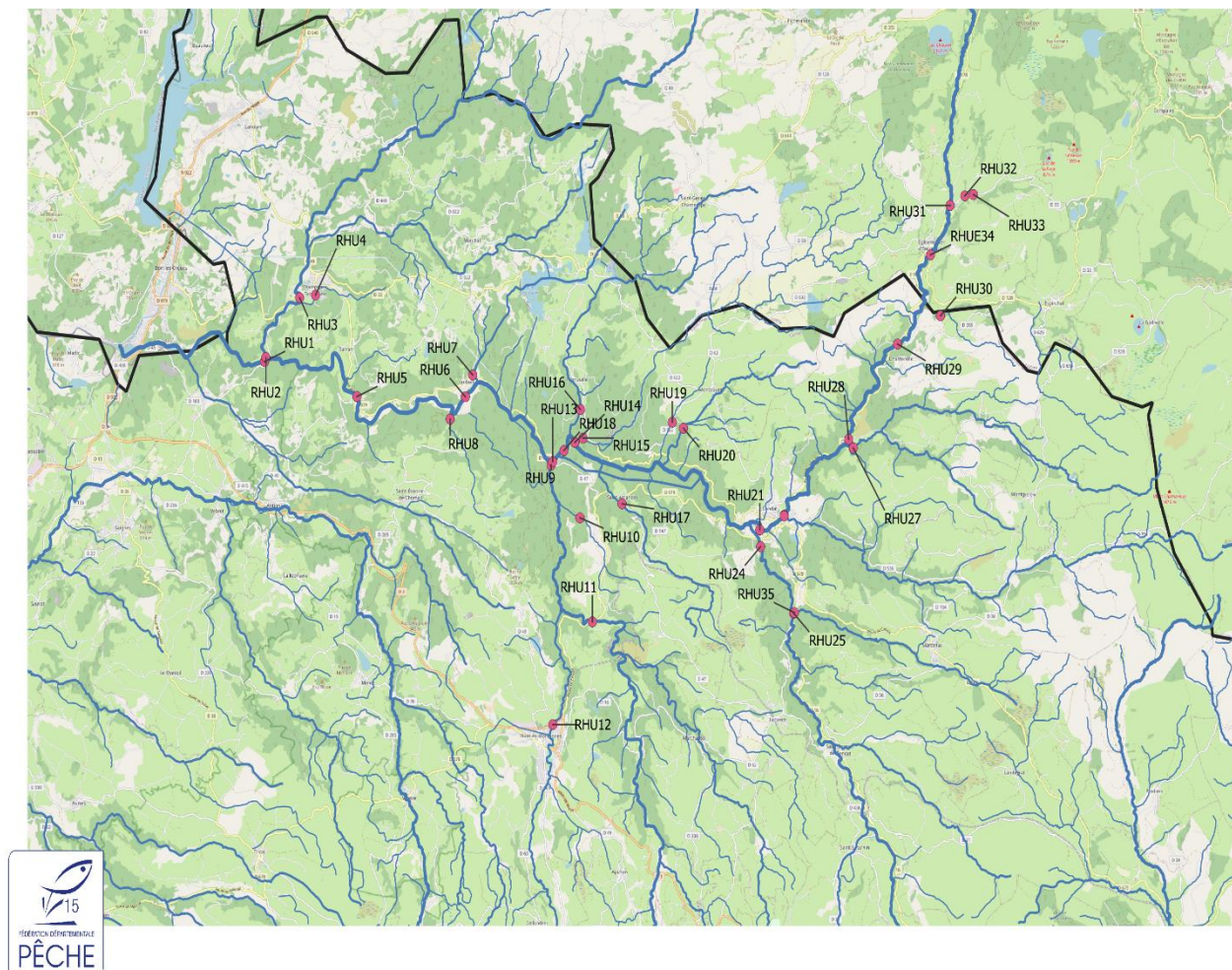


Figure 2 : carte de localisation des 35 échantillons d'eaux prélevés dans le bassin de la Rhue en juin 2022

4.2. Collecte et préparation des échantillons d'eaux

Les prélèvements ont été réalisés par Gilles Bareille du 20/06 au 24/06/2022 selon le protocole développé par G. Bareille à l'IPREM, en respectant les étapes suivantes (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 (en laboratoire);

- Prélèvement de l'eau de rivière grâce à une perche de prélèvement équipée d'une bouteille en polypropylène de 250 mL. Avant prélèvement de l'eau pour analyses, rinçage de la bouteille de 250 mL de 8 à 10 fois avec l'eau du site à prélever.
- Filtration de 125 mL d'eau à partir de la bouteille à prélèvement de 250 mL, grâce à un filtre PVDF Whatmann de porosité 0.45µm fixé sur une seringue en polypropylène avec stockage dans un flacon préalablement rincé 2 fois avec de l'eau filtrée du site de prélèvement et labélisé (numéro de site);
- 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 et de traitement des eaux sur le terrain.

Parallèlement aux prélèvements, la température, le pH et la conductivité ont été mesurés. Il ressort en effet que la conductivité est un paramètre particulièrement informatif, car hautement lié à la composition en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) de l'eau, et donc à l'origine géologique.

4.3 Analyses chimiques

La composition chimique des eaux a été déterminée au laboratoire IPREM de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA). Les échantillons d'eaux ont été préparés comme suit : 0.2 mL du standard interne Indium (In à 0.5 ppm) ont été ajoutés à 9.8 mL d'échantillon filtré et acidifié à 2%.



Des standards de calibration ont été préparés pour l'analyse de 7 éléments chimiques: calcium (Ca), magnésium (Mg), manganèse (Mn), strontium (Sr), potassium (K), baryum (Ba) et sodium (Na). La composition des eaux en ces éléments chimiques a été déterminée par spectrométrie d'émission atomique à plasma induit (ICP-AES). La quantification des concentrations a été réalisée par calibration externe (0-100 mg/L pour Ca, Na, K et Mg ; 0-10 à mg/L pour le Sr ; 0-1 mg/L pour Ba et Mn) à partir de standards en solution avec ajout de l'étalon interne (In à 0.5 ppm) comme pour les échantillons. La justesse et la répétabilité des analyses ont été évaluées grâce à l'analyse de deux standards certifiés d'eaux douces (SLRS6 et NIST1640A) tous les 10 échantillons. La répétabilité analytique est de 3-4% pour le Sr, 3% pour le Na, <1% pour le K, 3-8% pour le Ba, 1-3% pour le Ca, 3% pour le Mg, et 20-30% pour le Mn (répétabilité faible en raison de concentrations proches de la limite de détection). Pour les 3 éléments d'intérêt pour les otolithes (Ca, Sr et Ba), la justesse des analyses est de 91-97% pour le Sr, 91-93% pour le Ba et 93-98% pour le Ca.

L'analyse des isotopes du Sr nécessite une étape préalable de séparation matricielle sur colonne pour éliminer les éléments chimiques interférents (cations majeurs et Rb). Grâce aux résultats de l'analyse élémentaire, les volumes d'eau à évaporer afin d'obtenir 2µg de Sr pour chaque échantillon ont été calculés. L'évaporation s'est faite dans des tubes en téflon placés dans un Hotblock à 80°C. Après dessiccation totale, 4 mL d'acide nitrique de concentration 3M ont été ajoutés. L'élimination des éléments induisant des interférences polyatomiques et isobariques a été effectuée par séparation matricielle sur colonne via une résine échangeuse de cations (Cartouches 2mL Résine Sr-R50-S, Eichrom). Après avoir rincé la résine avec, successivement, 10 mL de HNO₃ 3M et 20mL d'eau MilliQ, celle-ci est conditionnée par passage de 2 mL de HNO₃ à 3M ; l'échantillon contenu dans 4 mL d' HNO₃ à 3M est ensuite introduit dans la colonne. 8 mL d'acide nitrique 3M sont alors passés dans la colonne afin d'éliminer les éléments interférents. Enfin, le strontium est élué de la colonne et récupéré dans des tubes de 12 mL par passage de 10 mL d'eau MilliQ. Enfin, on ajoute 200 µL de HNO₃ pur pour obtenir un éluât à 2%. L'analyse du ⁸⁷Sr :⁸⁶Sr est réalisée par spectrométrie de masse multicollection à plasma induit (MC-ICP-MS).

L'analyse du ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr a été réalisée en duplicat. La déviation entre répliques est de l'ordre de 0.005% au maximum, soit une reproductibilité du rapport isotopique du strontium de plus de 99,9%.



5. Résultats - Interprétations

5.1. Mesures physico-chimiques

Les résultats des mesures physico-chimiques de l'eau sont présentés en annexe (Annexe 1).

Lors des prélèvements en juin 2022 la température de l'eau variait en général de 15°C à 20°C, avec des températures un peu plus élevées dans la Santoire (20-21°C) et la partie aval de la Rhue (16-20°C) et légèrement plus froide (15-18°C) dans la Rhue amont.

En ce qui concerne le pH, il oscille de valeurs légèrement acides autour de 6.8 (Ruisseau de la Morthes et Véronne) à des valeurs alcalines 8-8.4 (Taurons, Gabacut, Loubinoux, Ruisseau de Montirin, Rhue aval et Tarentaine). Il se situe néanmoins assez largement autour de la neutralité pour le restes des échantillons de la Rhue et de ses affluents.

Il ressort une certaine hétérogénéité dans les valeurs de conductivité mesurées lors des prélèvements d'eau (Tableau 1) entre certains secteurs de la Rhue et entre la Rhue et certains de ces affluents.

La Rhue amont (RHU31 à 33) se distingue par sa faible concentration en ions majeurs (cond. = 72-85 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

L'axe de la Rhue entre l'aval de la confluence avec la Loubanère (RHU29) et l'amont de la confluence avec la Tarentaine (RHU5) présente une conductivité plus élevée avec des valeurs de 100-111 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci est très certainement lié avec les apports d'eaux de la plupart de ses affluents en rive gauche qui présentent des conductivités plus élevées : Loubanère (112), Loubinoux (108), Bonjon (127), Santoire (124-131), Petite Rhue (112-120), ruisseau de la Scie (107). Par contre, les affluents de la Rhue en rive droite sont quant à eux principalement caractérisés par de plus faibles conductivités : Monboudif (95), Gabacut (71), Taurons (60) et Embort (55), à l'exception du ruisseau de la Morthe (106). Ces affluents en rive droite ne semblent pas fortement affecter la conductivité de l'axe de la Rhue.

Enfin, la Rhue à l'aval de la Tarentaine (RHU1) voit sa conductivité diminuer à 94 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en relation avec les apports d'eau de la Tarentaine à plus faible conductivité (66-68 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Les mesures de conductivité traduisent une hétérogénéité modérée des concentrations en ions entre ces différents cours d'eau, mais reflètent cependant des différences de substrats géologiques entre certains bassins versants drainant principalement des roches volcaniques (Rhue amont, Bonjon, Loubinoux) ou des roches métamorphiques (Embort, Taurons, Tarentaine) ou un mélange des deux (Petite Rhue, Véronne, Santoire, Gabacut) (*figure 4*).

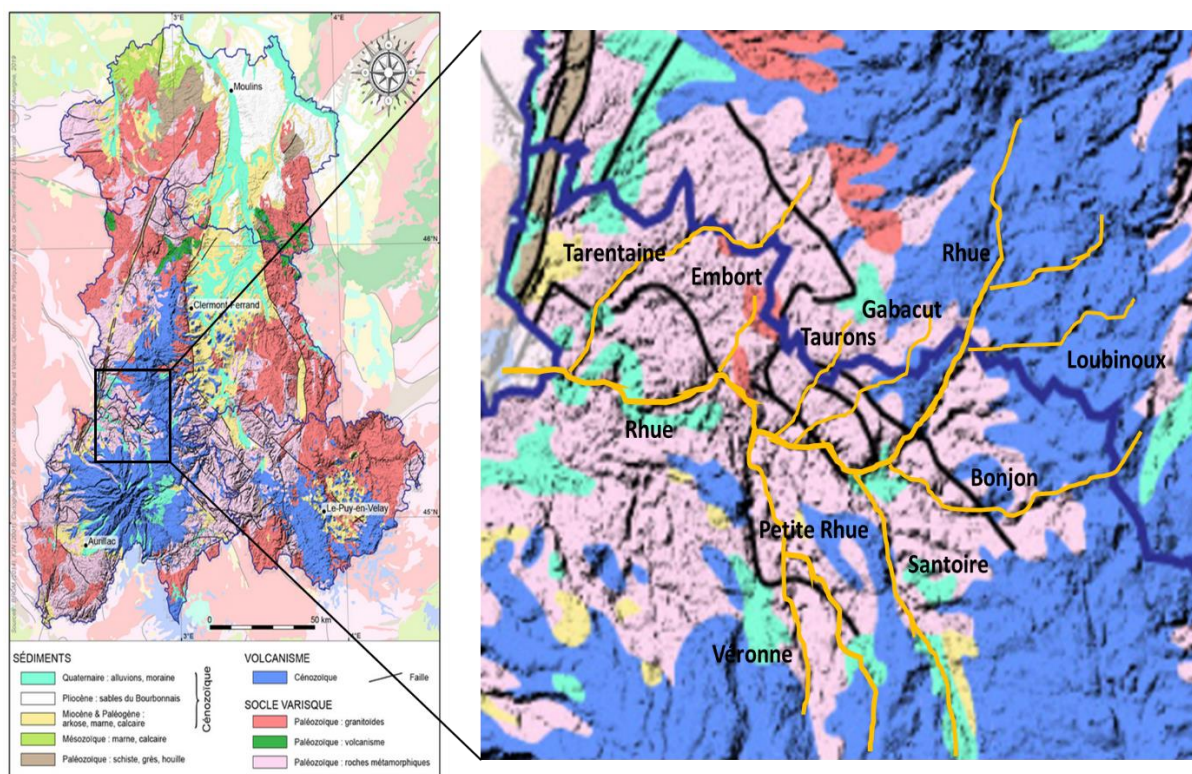


Figure 4 : carte géologique simplifiée du bassin de la Rhue ; Bleu : roches volcaniques ; rose clair : roches métamorphiques ; rose foncé : granites ; vert : alluvions quaternaires.

Projet de Collaboration Scientifique ECTRO



N° de sites	Rive	Rivières	Sr/Ca		Ba/Ca		Sr/Ba		Conductivité μS/cm	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	
			moy	SD	moy	SD	moy	SD		Mean	SD
RHU1		RHUE	9,2	0,8	1239,5	253,5	7,4	1,2	94	0,70614	0,000013
RHU5		RHUE	9,6	0,6	1158,4	197,3	8,3	1,1	104,1	0,70568	0,000039
RHU6		RHUE	9,9	0,5	1278,7	133,8	7,7	0,6	106	0,70541	0,000004
RHU13		Grande RHUE	9,6	0,7	1160,6	199,8	8,3	1,1	101,6	0,70561	0,000014
RHU18		Grande RHUE	9,7	0,6	1108,5	152,0	8,7	0,9	102,2	0,70548	0,000031
RHU14		Grande RHUE	10,0	0,6	1203,2	181,9	8,3	1,0	107,1	0,70534	0,000018
RHU21		Grande RHUE	10,5	0,5	1432,4	221,1	7,4	0,9	110,7	0,70529	0,000008
RHU22		Grande RHUE	10,4	0,5	1364,7	231,7	7,6	1,2	107	0,70522	0,000013
RHU28		Grande RHUE	10,1	0,7	1329,0	223,6	7,6	0,9	101,8	0,70621	0,000020
RHU29		Grande RHUE	10,1	0,4	1549,1	112,8	6,5	0,3	101,4	0,70488	0,000013
RHU34		Grande RHUE	11,0	0,3	1401,9	114,5	7,8	0,6	79	0,70462	0,000016
RHU31		Grande RHUE (R. Clamouze)	10,5	1,3	1146,7	400,6	9,2	3,2	72,2	0,70464	0,000016
RHU32		Grande RHUE (R. de Groleix)	10,6	0,9	1244,4	210,4	8,5	1,3	73,1	0,70436	0,000011
RHU33		Grande RHUE (R. d'Entraigues)	10,4	0,9	1139,9	281,4	9,1	2,3	85	0,70437	0,000037
RHU9	RG	Petite RHUE	9,5	0,6	1196,3	162,7	8,0	1,1	119,1	0,70525	0,000022
RHU10	RG	R. de Jointy	7,7	0,4	803,5	138,5	9,5	1,8	114,3	0,70576	0,000010
RHU12	RG	Veronne	10,6	0,3	1120,2	125,0	9,5	1,2	150,9	0,70453	0,000002
RHU11	RG	Petite RHUE	11,8	0,9	1657,7	290,6	7,1	0,9	112,4	0,70507	0,000008
RHU23	RG	R. Bonjon	10,5	0,6	1767,0	140,5	6,0	0,4	127	0,70529	0,000006
RHU19	RD	R. de la Morthe	8,0	0,8	2999,4	415,1	2,7	0,4	106,3	0,71023	0,000009
RHU8	RG	R. de la Scie	6,3	0,1	1216,4	127,7	5,2	0,5	106,7	0,70886	0,000031
RHU20	RD	R. de Monboudif	10,6	0,5	2048,0	228,7	5,2	0,4	95,4	0,70803	0,000031
RHU7	RD	R. d'Embort	7,5	0,4	1137,5	128,7	6,6	0,6	55,4	0,70699	0,000023
RHU15	RD	R. du Gabacut	8,6	1,1	1626,7	290,7	5,3	1,1	70,8	0,70691	0,000020
RHU16	RD	R. du Taurons	7,6	0,5	1637,5	315,4	4,7	0,7	59,6	0,70868	0,000022
RHU30	RG	R. Loubanère	9,9	0,7	851,2	116,0	11,7	1,4	112,2	0,70449	0,000024
RHU27	RG	R. Loubinoux	11,0	0,9	1247,6	204,0	8,8	1,2	108,4	0,70568	0,000005
RHU17	RG	R. St-Amandin	6,2	0,5	808,8	140,0	7,7	1,3		0,70751	0,000021
RHU24	RG	Santoire	10,7	0,5	1177,4	84,2	9,1	0,6	131	0,70519	0,000026
RHU35	RG	R. de Bastide	10,5	0,8	1617,2	230,1	6,5	0,8	125	0,70540	0,000015
RHU25	RG	Santoire	11,7	0,2	1072,1	138,3	10,9	1,5	124,1	0,70483	0,000042
RHU2	RD	Tarentaine	8,2	1,1	2792,3	562,6	2,9	0,5	67,4	0,70802	0,000028
RHU3	RD	Tarentaine	8,6	1,0	2860,5	451,2	3,0	0,5	66,5	0,70744	0,000029
RHU4	RD	R. de Montirin	5,1	0,6	2795,3	349,4	1,8	0,3	82,6	0,71405	0,000015
RHU36		Couze Pavin	7,3	0,9	811,6	178,4	9,0	2,2	109,4	0,70556	0,000009

Tableau 1: rapports Sr/Ca, Ba/Ca, Sr/Ba et ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr déterminés suite aux analyses chimiques réalisées sur les eaux du bassin de la Rhue. Mesures de conductivité effectuées sur le terrain.



5.2. Analyses élémentaires et isotopie du Sr - potentiel de discrimination Rhue - affluents

Les concentrations (écartype = SD) des 7 éléments mesurés dans les eaux de la Rhue et de ses affluents (Ba, Ca, Sr, K, Mg, Mn, Na) sont présentées en annexe 2.

Ces concentrations varient de (annexe 2 et 3) :

- 0.5 à 3 mg/L pour le potassium (K)
- 2 à 7 mg/L pour le magnésium (Mg)
- 3 à 6 mg/L pour le sodium (Na)
- 5 à 12 mg/L pour le calcium (Ca)
- 34 à 127 µg/L pour le strontium (Sr)
- 5 à 21 µg/L pour le baryum (Ba)

Les concentrations trouvées en éléments majeurs (Ca, K, Mg et Na) sont globalement caractéristiques d'eaux drainant des substrats silicatés, en accord avec la couverture géologique de la zone étudiée (roches silicatées principalement métamorphiques et volcaniques, parfois granitiques).

Parmi les indicateurs utiles pour la discrimination d'origines via la microchimie des otolithes, nous avons cité précédemment le Sr et le Ba, et plus particulièrement leurs rapports au calcium (Sr/Ca, Ba/Ca et Sr/Ba). En effet, dans les otolithes la discrimination de cours d'eau est préférentiellement observée via ces rapports plutôt que les concentrations de ces deux éléments dans la rivière. Compte tenu de l'objectif initial du projet ECTRO, i.e. évaluer la possibilité de discriminer des origines via la microchimie des otolithes, nous examinerons essentiellement ces rapports dans les eaux de la Rhue et de ses affluents dans ce qui suit.

Le tableau 1 présentent les données des 3 rapports Sr/Ca, Ba/Ca, Sr/Ba et du rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Les figures 5a et 5b représentent sous forme d'histogrammes, respectivement, la distribution des 2 principaux ratios élémentaires Sr/Ca et Ba/Ca (Fig 5a) et du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Fig. 5b), marqueurs généralement utilisés pour discriminer les origines natales.

Les points notables à signaler sont les suivants :

1) Rapport Sr/Ca :

- Sr/Ca relativement homogène le long du cours de la Rhue : 9-11
- Des affluents avec Sr/Ca similaire à l'axe de la Rhue (Petite Rhue aval, Véronne, Santoire aval, Bonjon, Loubinoux, Loubanère, Ruisseaux de Bastide et de Monboudif) ;
- Des affluents avec Sr/Ca légèrement plus élevé que l'axe de la Rhue (Petite Rhue amont, Santoire amont) : 11.5-12

- Des affluents à Sr/Ca plus faible que l'axe de la Rhue (Tarentaine et ruisseau de Montirin, Ruisseaux d'Embort, de la Scie, de Saint-Amandin et de Jointy, Gabacut et Taurons, Couze Pavin) : 6-8.5

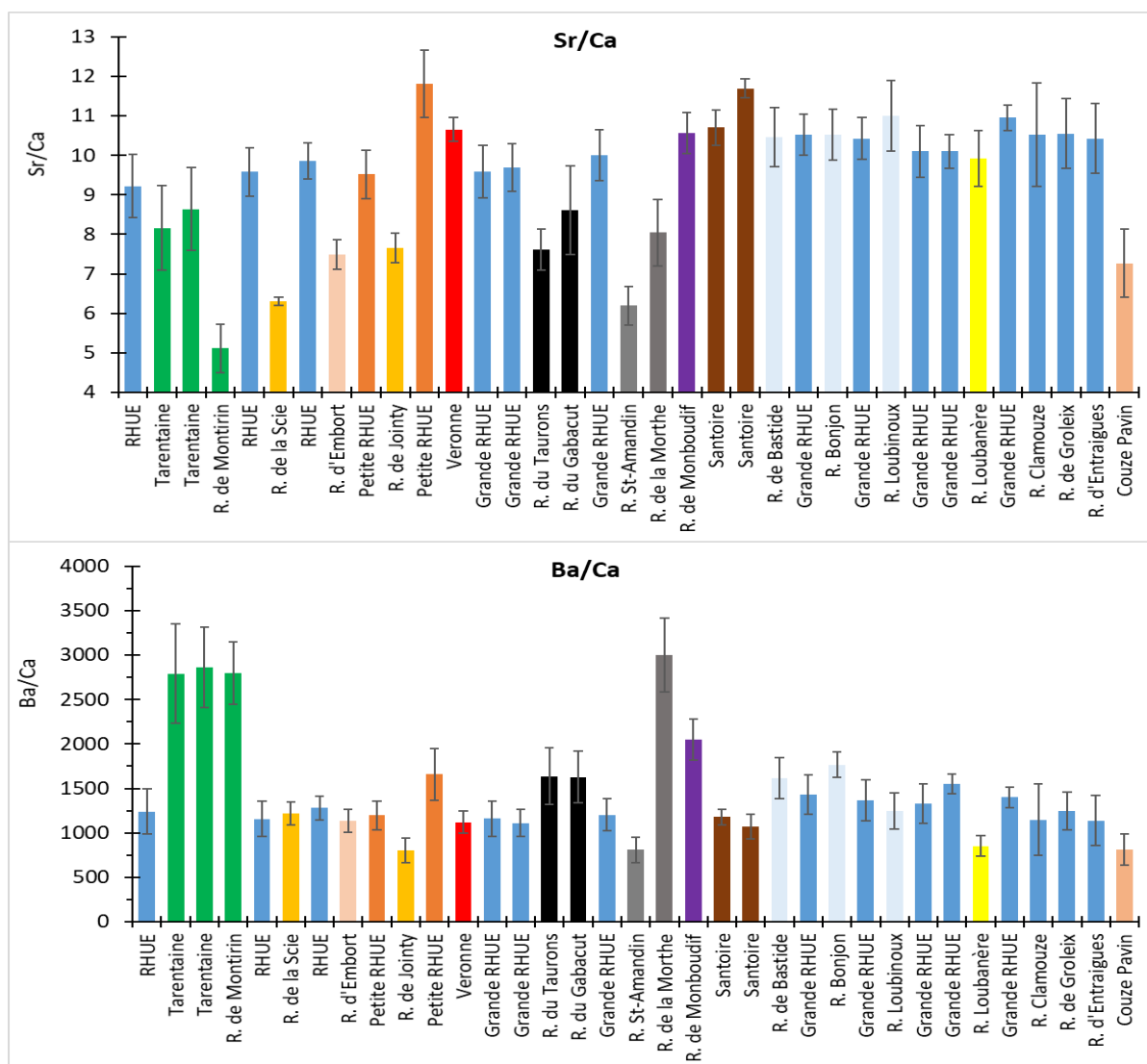


Figure 5a : distribution aval (Gauche) – amont (droite) des rapports Sr/Ca et Ba/Ca dans les eaux de la Rhue et ses affluents, ainsi que dans la Couze Pavin. Les histogrammes en bleu foncé représentent les échantillons de l'axe de la Rhue. Les autres couleurs représentent les affluents et la Couze Pavin.

2) Rapport Ba/Ca :

- Ba/Ca relativement homogène le long du court de la Rhue : 1100-1400 en général;



- Des affluents à Ba/Ca similaire à l'axe de la Rhue (Ruisseaux de la Scie et d'Embort, Loubinoux, Petite Rhue aval, Santoire amont, Véronne) ;
- Des affluents à Ba/Ca plus élevé que dans la Rhue (Tarentaine et ruisseau de Montirin, ruisseaux de la Morthes et de Monboudif) : 2000-3000 ; et dans une moindre mesure (Petite Rhue amont, Santoire aval, Bonjon, Taurons et Gabacut ; ruisseau de Bastide) : 1500-1600 ;
- Des affluents à Ba/Ca moins élevé que dans la Rhue (Loubanère, Ruisseaux de Jointy et Saint-Amandin, Couze Pavin) : 800-850.

3) Rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$:

- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement bas dans la partie amont de la Rhue, jusqu'à la confluence du Loubinoux : 0.7044-0.7049
- Depuis l'aval du Loubinoux et jusqu'à la confluence de la Tarentaine, le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmente légèrement pour dépasser 0.705 (0.7052-0.7057), puis il augmente à nouveau à l'aval de la Tarentaine sous l'influence de cet affluent : 0.7061
- Des affluents avec $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ peu différent de l'axe de la Rhue (Petite Rhue, Véronne, Santoire, Bonjon, Loubinoux, Loubanère, Ruisseaux de Bastide et de Jointy)
- Des affluents avec $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevé que l'axe de la Rhue : Tarentaine (0.7074-0.708 ; R. Montirin : 0.714), Ruisseau de la Scie (0.7089) ; Taurons (0.7087) ; Gabacut (0.7069, St-Amandin (0.7075), Morthes (0.7102), Monboudif (0.708); le Loubinoux est très légèrement plus élevé que la Rhue : 0.7057 contre 0.7052.
- Des affluents à $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ légèrement plus faible que l'axe de la Rhue (Véronne) : 0.7045

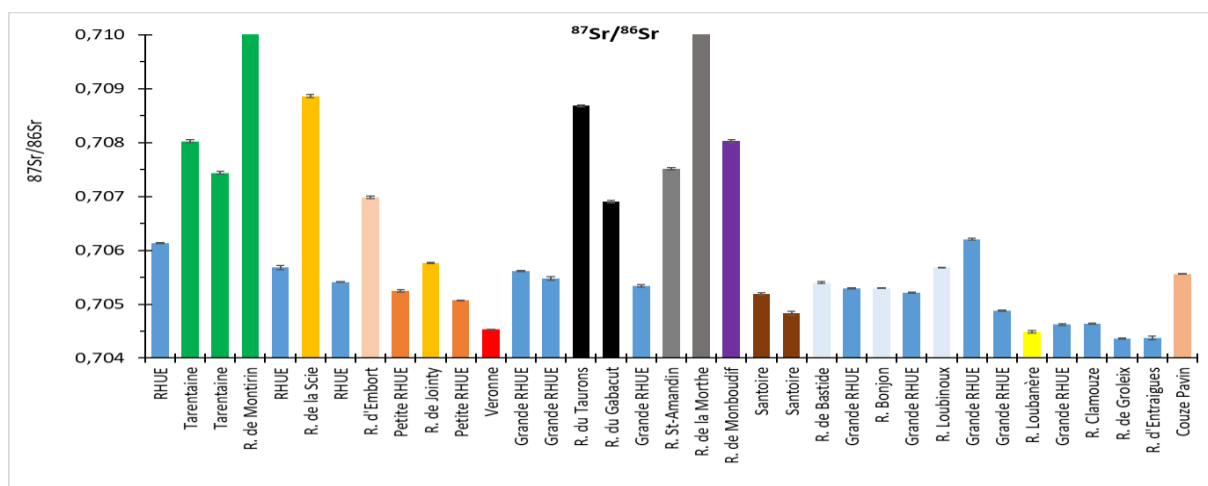


Figure 5b : distribution aval (Gauche) – amont (droite) du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les eaux de la Rhue et ses affluents, ainsi que dans la Couze Pavin. Les histogrammes en bleu foncé représentent les échantillons de l'axe de la Rhue. Les autres couleurs représentent les affluents et la Couze Pavin.



Pour évaluer plus finement le pouvoir discriminatoire de ces différents rapports, nous les avons combinés deux à deux en exprimant le Sr/Ca en fonction du Ba/Ca (figure 6a) et le Sr/Ca en fonction du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (figure 6b).

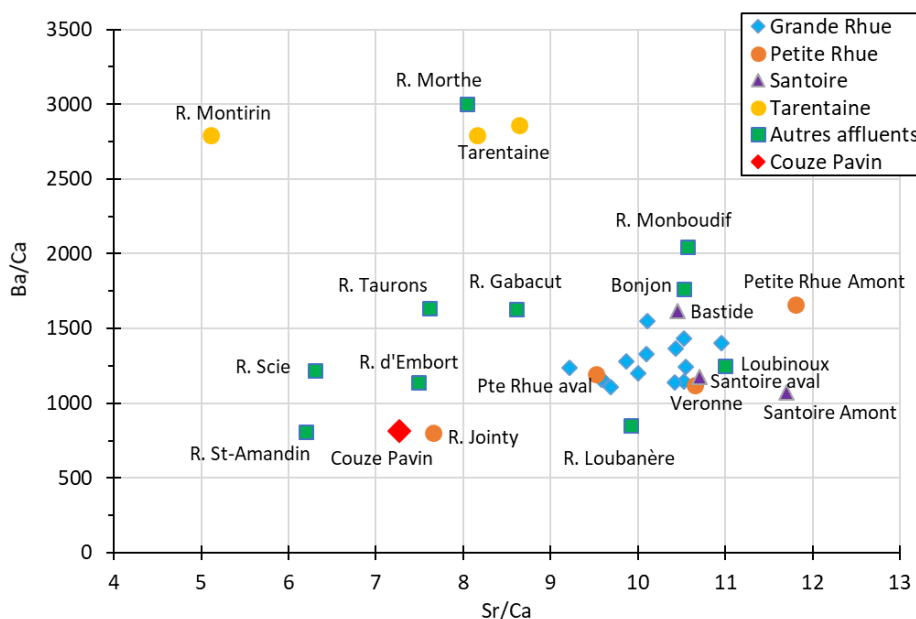


Figure 6a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents.

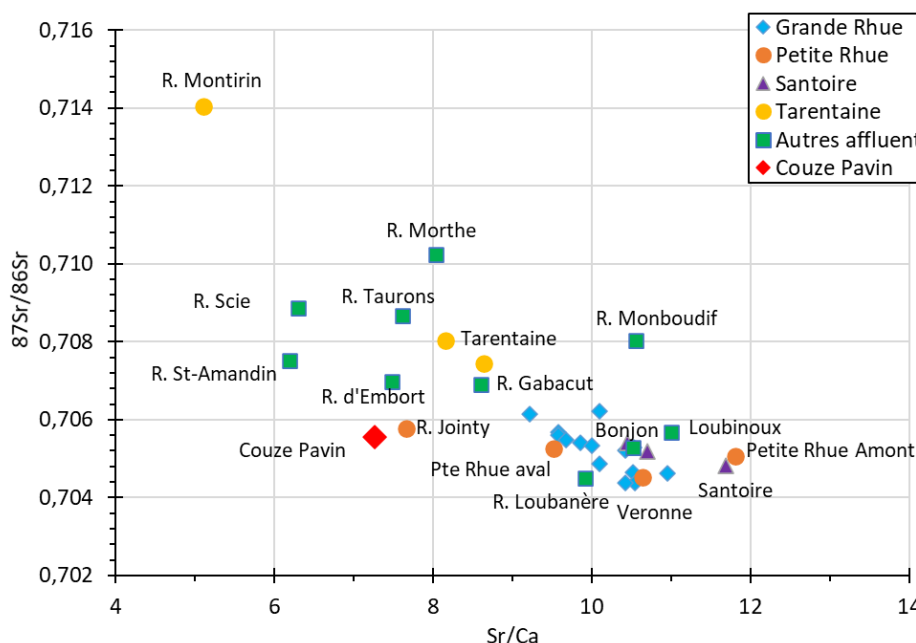


Figure 6b : Sr/Ca en fonction du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les eaux de la Rhue et de ses affluents.

Globalement, on distingue que les traceurs Sr/Ca, Ba/Ca et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ permettent de discriminer tous les affluents en rive droite (Tarentaine, Embort, Taurons, Gabacut, Morthes et Monboudif) et deux en rive gauche (ruisseau de la Scie et de St-Amandin). Par contre, tous les autres affluents situés en rive gauche sont plus difficilement différenciables de l'axe de la

Rhue (voir également annexe 4 avec distribution spatiale sous forme de cartes schématiques des trois marqueurs).

Le cours de la Rhue étant fragmenté par 2 grands barrages - le barrage de Vaussaire situé à l'aval de Coindre et de la confluence de la Petite Rhue et le barrage des Essarts situé à l'aval de Condat – nous avons défini 3 secteurs (figure 7) et regardé si les affluents situés dans ceux-ci se différenciaient de l'axe de la Rhue.

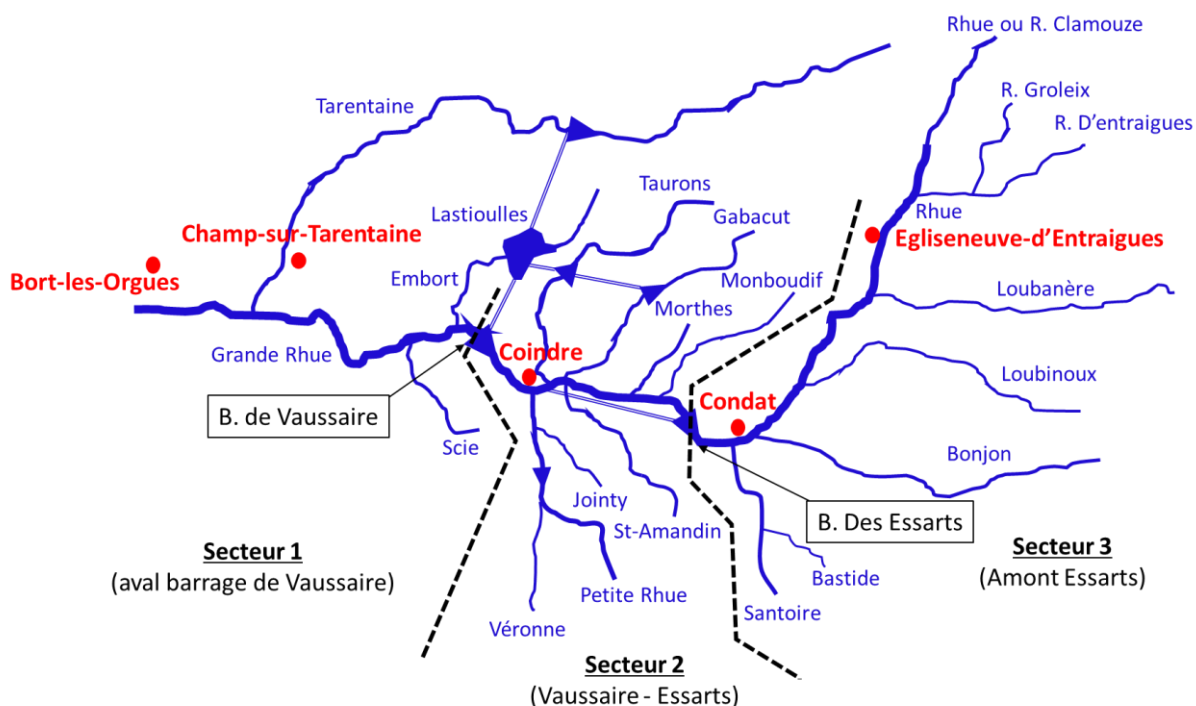


Figure 7 : présentation des 3 secteurs définis et affluents localisés dans ceux-ci.

Le premier secteur (Secteur 1) comprend le tronçon de la Rhue compris entre la confluence avec la Dordogne (à l'aval) et le barrage de Vaussaire à l'aval de Coindre. 3 affluents rejoignant la Rhue dans ce secteur ont été étudiés. D'aval vers l'amont, il s'agit de la Tarentaine (RD), du ruisseau de la Scie (RG) et enfin du ruisseau d'Embort (RD) provenant du lac de Lastioules. Outre ces affluents, ce secteur est également alimenté par une conduite forcée en provenance du lac de Lastioules qui collecte des eaux des bassins de la Tarentaine, du Taurons et du Gabacut. Les 3 affluents semblent assez bien différenciés de l'axe de la Rhue dans ce secteur, les ruisseaux d'Embort et de la Scie par le Sr/Ca essentiellement, la Tarentaine un peu moins par le Sr/Ca mais largement par le Ba (figure 8a). Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ apporte une plus-value importante (figure 8b) à l'analyse élémentaire car il permet de discriminer à coup sûr les ruisseaux de la Scie et d'Embort, ainsi que ces deux ruisseaux et la Tarentaine de la Rhue. Enfin, le ruisseau de Montirin, affluent de la Tarentaine au niveau de Champ-sur-



Tarentaine, se différencie également très largement de la Tarentaine ce qui permettrait d'identifier si des truites se sont développées au stade juvénile dans ce ruisseau avant de migrer dans la Tarentaine.

Au final, sous réserve que ces signatures n'évoluent pas saisonnièrement, il serait donc possible d'identifier des truites migrantes de ces affluents vers la Rhue, et vice-versa, sur la base de l'analyse élémentaire et isotopique.

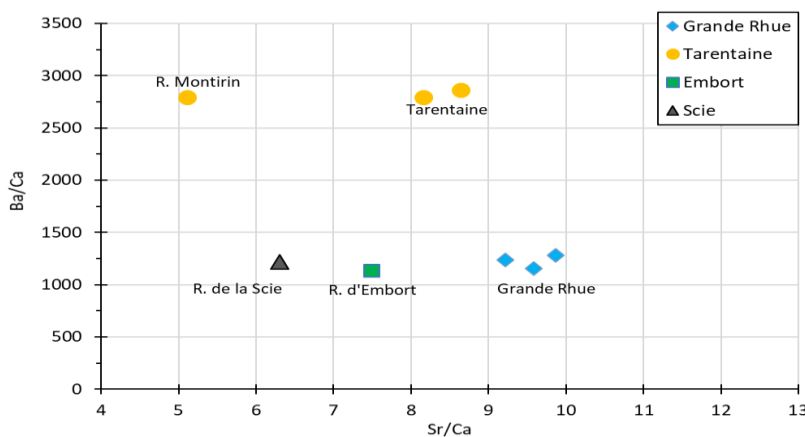


Figure 8a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 1 (aval Vaussaire).

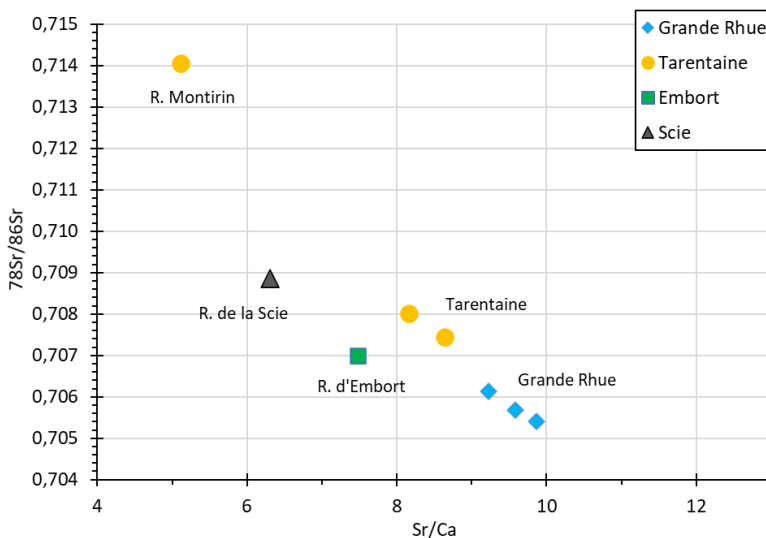


Figure 8b : Sr/Ca en fonction du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 1 (aval Vaussaire).

Le deuxième secteur (Secteur 2) comprend la zone de la Rhue entre le barrage de Vaussaire et le barrage des Essards à l'aval de Condat (figure 7). 6 affluents rejoignent la Rhue dans ce secteur. De l'aval vers l'amont, il s'agit de la petite Rhue (RG), le Saint-Amandin (RG), le Taurons (RD), le Gabacut (RD), le ruisseau de la Morthes (RD) et le ruisseau de Monboudif (RD). Dans ce secteur, des eaux issues du barrage des Essards sont transportées par conduite forcée et turbinées au niveau de l'usine hydroélectrique de Coindre, soit juste dans la partie



aval de ce secteur. Cela a, à priori, peu d'influence car la signature chimique de la Rhue reste inchangée entre l'amont et l'aval de ce secteur.

Parmi les différents affluents étudiés, la Petite Rhue et la Véronne sont caractérisées par des signatures chimiques en Sr/Ca, Ba/Ca et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ très similaires à la Rhue (figure 9 a, b). Il sera par conséquent difficile d'identifier des échanges de poissons entre ces deux affluents et la Rhue via la microchimie élémentaire et isotopique. Par contre, le ruisseau de Jointy, affluent de la petite Rhue dans sa partie aval, devrait pouvoir être différencié de la petite Rhue et la Rhue par sa composition élémentaire (Sr/Ca et Ba/Ca) mais pas par son isotopie.

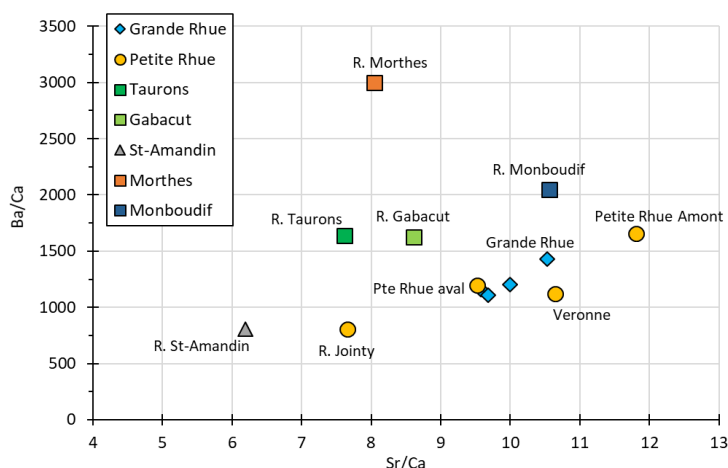


Figure 9a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 2 : Vaussaire - Essarts.

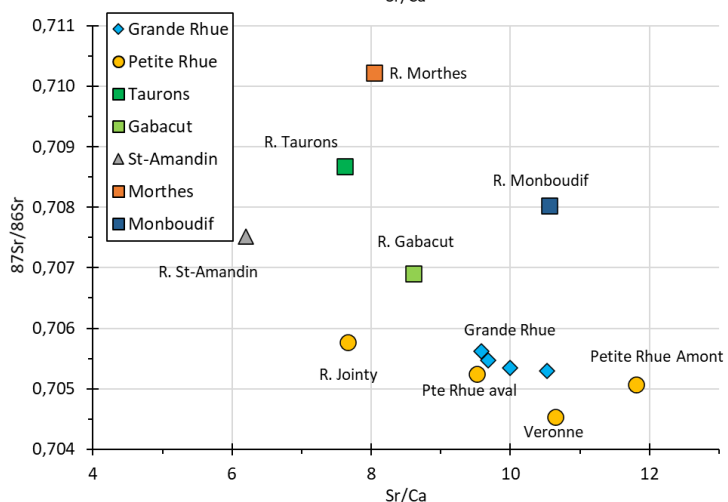


Figure 9b : Sr/Ca en fonction du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 2 : Vaussaire - Essarts.

Deux affluents se distinguent modérément de la Rhue (figure 9a) par leur composition élémentaire, le Gabacut (Sr/Ca) et le Monboudif (Ba/Ca). Par contre, ils se distinguent tous les deux très bien de la Rhue par leur isotopie (figure 9b). Il est donc envisageable d'identifier des individus ayant dévalé de ces affluents dans la Rhue.

Les trois derniers affluents du secteur semblent pouvoir être discriminés aisément de la Rhue par leur composition élémentaire : Taurons (Sr/Ca), Saint-Amandin (Sr/Ca, dans une



moindre mesure Ba/Ca) et Morthes (Sr/Ca et Ba/Ca). On peut aussi signaler que Morthes, Taurons, Saint-Amandin sont discriminables les uns des autres. Par contre, cela risque d'être un peu plus problématique entre le Taurons et le Gabacut uniquement sur la base élémentaire. Par contre, le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est très performant dans ce secteur car il permet sans trop d'ambiguïté de discriminer l'ensemble des affluents entre eux et avec la Rhue (sauf pour la petite Rhue), la composition élémentaire amenant un plus dans le degré de discrimination. Il est donc envisageable de pouvoir identifier de la mobilité de la truite entre les affluents et la Rhue dans le secteur 2, sauf entre la petite Rhue aval et la Rhue.

Le dernier secteur (Secteur 3) consiste dans la partie de la Rhue à l'amont du barrage des Essarts. 4 affluents se déversent dans la Rhue dans ce secteur, tous en rive gauche (RG). De l'aval vers l'amont (figure 7), il s'agit de La Santoire, le Bonjon, le Loubinoux et le Loubanère.

Sur les figures 10 a et b, on peut voir que la Santoire et le Loubinoux semblent peu différenciés de l'axe de la Rhue vis-à-vis de leur composition élémentaire (Sr/Ca et Ba/Ca). En ce qui concerne les deux autres affluents, le Loubanère montre un rapport Ba/Ca légèrement plus faible que la Rhue et le Bonjon un Ba/Ca un peu plus élevé. Compte tenu de la très grande variabilité inter-individuelle observée dans l'incorporation du Ba/Ca chez les salmonidés (Bareille, données non publiées), il n'est pas certain que cela suffise à discriminer les poissons de ces deux affluents de l'axe de la Rhue avec l'otolithe. Malheureusement, le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ lui non plus n'est pas très différent entre ces 4 affluents et la Rhue : Loubanère 0.7045, Loubinoux 0.7057, Bonjon 0.7053 et Santoire 0.7053- et la Rhue 0.7049-0.7053.

Totalement en amont, les ruisseaux d'Entraigues et de Groleix se mélangent à la Rhue (ou ruisseaux de Clamouze). Ces ruisseaux ont des signatures très similaires entre eux que ce soit en élémentaire et en isotopie, cette dernière étant légèrement plus faible (0.7044-0.7046) qu'à l'aval de ce secteur où le Loubinoux, le Bonjon et la Santoire font légèrement remonter le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la Rhue au-dessus de 0.705. Enfin, l'affluent de la Santoire, le ruisseau de Bastide, présente une signature plus faible en Sr/Ca et plus forte en Ba/Ca que la Santoire amont ; ceci laisse entrevoir qu'il sera peut-être possible d'examiner des échanges entre la Santoire et son affluent, mais pas avec le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de Bastide qui est très similaire à la Santoire.

Au final, on peut imaginer que la microchimie des otolithes ne sera pas efficace pour identifier des déplacements entre les différents affluents et l'axe de la Rhue dans le secteur 3, il faudra néanmoins vérifier si le Ba/Ca ne permet cependant pas de discriminer le Bonjon et le Loubanère de la Rhue.

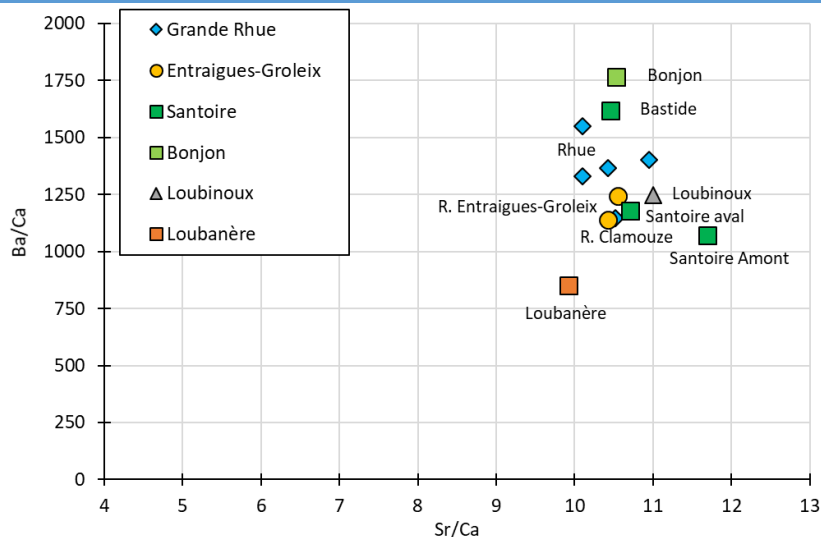


Figure 10a : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 3 : amont Essarts.

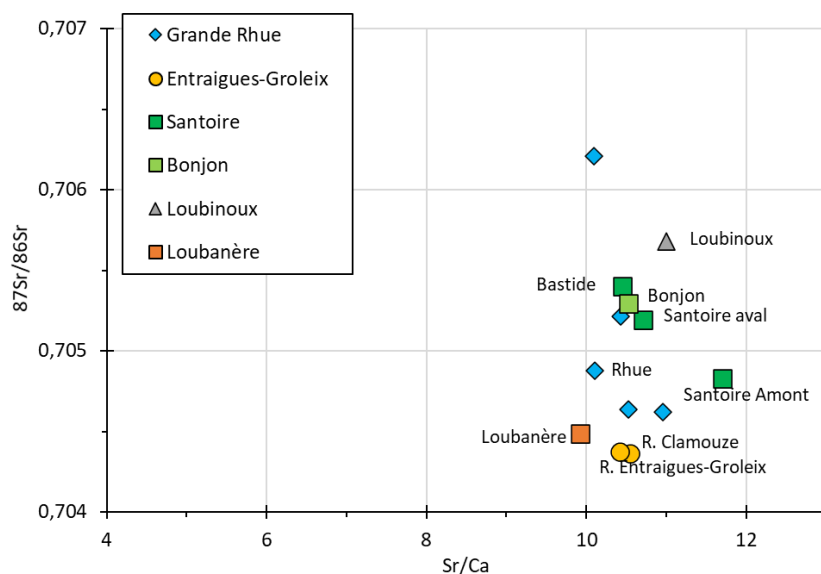


Figure 10b : Sr/Ca en fonction du Ba/Ca pour les eaux de la Rhue et de ses affluents au niveau du secteur 3 : amont Essarts.

5.3. Discussion sur les analyses isotopiques

Au regard des données disponibles dans la littérature scientifique sur le Massif Central, on pouvait s'attendre à retrouver un rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) aux environ de 0.703 à 0.7045 en domaine volcanique (Négreil and Deschamps, 1996 : Allanche basin ; Chauvel, 1982 : strato volcan cantalien et Mont-Dore ; Steinmann and Stille, 2008 : ruisseaux Séjallières et Malaval). Et en effet, le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que nous avons trouvé dans le secteur amont de la Rhue (Ruisseaux de Clamouze, Entraigues et Groleix) se situe dans cette fourchette.



A l'inverse, pour des rivières drainant des bassins à substrat essentiellement métamorphique (gneiss et micaschistes), le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ devrait être significativement plus élevé : 0.715 à 0.719 (Négre, 1999 : Desges river basin). Ce pourrait être le cas pour les affluents Scie, Embort, Saint-Amandin, Montirin, Morthes, Taurons, Jointy et Tarentaine, qui drainent en grande partie des substrats métamorphiques. Il était cependant nécessaire de rester prudent car certains de ces affluents peuvent, dans leur partie la plus amont, drainer des terrains volcaniques. En outre, Steinmann and Stille (2008) ont montré que pour des rivières drainant des substrats mixtes, volcanique en tête de bassin et granitique/métamorphique dans leur partie intermédiaire et aval, la signature $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de l'axe de la rivière était très largement influencée par la signature des terrains volcaniques, même si ceux-ci ne représentaient qu'un faible pourcentage du bassin versant ; ceci très certainement en raison d'une érosion chimique plus importante des roches volcaniques par rapport aux roches métamorphiques de type gneiss et micaschistes. Ces auteurs ont ainsi trouvé un $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ typiquement volcanique dans la partie amont de la rivière (0.703-0.704) et un rapport faiblement modifié dans les parties intermédiaires et aval (0.7045 – 0.706) suggérant que 80-97% du Sr présent dans la rivière provenait de l'érosion des terrains basaltiques.

Dans notre cas, nous avons pu également constater que pour les affluents traversant des substrats volcaniques en amont puis des substrats métamorphiques (zone intermédiaire et aval), comme la Tarentaine, le Taurons, le Gabacut, le St-Amandin, la Morthes, Embort, le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ présentait des valeurs relativement faible (0.707-0.7102) suggérant comme dans la littérature l'influence significative du substrat volcanique amont. Les affluents les plus importants comme la petite Rhue et la Santoire, ainsi que les affluents rive gauche en amont de Condat (Loubanère, Loubinoux, Bonjon), qui traversent préférentiellement des domaines volcaniques dans leur partie amont voire intermédiaire, se caractérisent tous par une isotopie typiquement volcanique (0.7045-0.7057) et de ce fait sont difficilement discriminables de l'axe de la Rhue



6. RESUME

Ces premiers résultats sont encourageants car ils suggèrent qu'il est possible de différencier certains affluents du cours de la Rhue à partir de la chimie de l'eau, en couplant les marqueurs Sr/Ca, Ba/Ca, Sr/Ba et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Parmi ces affluents, ce sont essentiellement ceux situés à l'aval de Condat en rive droite (Tarentaine, Embort, Taurons, Gabacut, Morthes, Monboudif) et en rive gauche (Scie, Saint-Amandin).

Par contre, les affluents situés en rive gauche en amont de Condat, parmi lesquels les deux principaux que sont la Petite Rhue et la Santoire ainsi que le Bonjon, le Loubinoux et le Loubanère, semblent plus difficiles à discriminer de l'axe de la Rhue. Il faudra néanmoins faire un test avec les otolithes pour voir si le Bonjon et le Loubanère ne sont vraiment pas discriminables, en particulier avec le Ba/Ca.

Il est important de garder à l'esprit que les résultats présentés ne constituent qu'une image instantanée (1 seul échantillon d'eau à un instant t), qui ne prend pas en considération la variabilité temporelle naturelle de ces marqueurs. Ces résultats doivent donc être considérés avec prudence.

Il apparaît cependant raisonnable d'engager dès à présent la prochaine étape sur des otolithes de truites, du moins dans les secteurs 1 (aval du barrage de Vaussaire) et 2 (entre les barrages de Vaussaire et des Essarts).

Enfin, Je préconiserais par ailleurs que quelques individus soient également récupérés sur les affluents faiblement discriminés afin de vérifier l'impossibilité de les différencier de la Rhue ; d'autres facteurs comme la température et la croissance interviennent dans les signatures enregistrées dans les otolithes et peuvent donc contribuer à la discrimination.

7. Références

Bareille G., Baumann L., Holub A., Tabouret H., Pécheyran C., Bérail S., 2017b. Etude de l'origine natale et de l'histoire de vie de la truite fario (*Salmo trutta fario*) du bassin de la Garonne amont par isotopie du Strontium (^{87}Sr : ^{86}Sr) des otolithes. *Rapport final d'étude* : Fédération départementale de pêche de Haute-Garonne (FDP31), Octobre 2017, 59p. (hal-03640136v1)

Bareille G., Holub A., Vignon M., Tabouret H., Pécheyran C., Bérail S., Barracou D., Dartau B., Marty S., Picoulet K., 2017. Contribution de l'Alevinage et des Rivières pyrénéennes au retour de POissons Migrateurs (saumon, alose) dans le Bassin de l'Adour et la Nivelle : application et amélioration de l'outil



microchimie des otolithes (CARPOMIBA). *Rapport final d'étude : AEAG* (N° : 240 64 2157 / Décision d'attribution d'aide 2013/6232), Octobre 2017, 64p. (hal-03140245v1)

Bouquet B., H. Tabouret, P. Gilbert, G. Bareille, G. Carrel, Argilier C., F. Morat, 2021. Spawning areas and migration patterns in the early life history of *Squalius cephalus* (Linnaeus, 1758): use of otolith microchemistry for conservation and sustainable management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31: 2772-2787. Doi: 10.1002/aqc.3682

Chauvel C., 1982. Géochimie isotopique (Nd, Sr) et géochimie des éléments traces des basaltes alcalins du Massif Central français : contraintes pétrogénétiques et arguments en faveur du métasomatisme mantellique. *Géochimie*. Université de Rennes 1 (UR1), 1982. Français. NNT : tel-01576112

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.

Martin J., Bareille G., Berail S., Daverat F., Pécheyran C., Bru N., Tabouret H. and Donard O.F.X., 2013a. 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. <https://dx.doi.org/10.1111/jfb.12089> (hal-00867069v1)

Martin J., G. Bareille, S. Berail, F. Daverat, C. Pécheyran, N. Bru, E. Beall, F. Gueraud, F. Lange, D. Barracou, O.F.X. Donard, 2013b. 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.

Martin J., Quentin Rougemont Q., Drouineau H., Launey S., Jatteau P., Bareille G., Berail S., Pécheyran C., Feunteun E., Roques S., Clavé D., Nachón D.J., Antunes C., Mota M., Réveillac E. and Daverat F., 2015. Dispersal capacities of anadromous Allis shad population inferred from a couple genetic and otolith approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72: 1-13. <https://dx.doi.org/10.1139/cjfas-2014-0510> (hal-01557337v1)

Nachón-García D.-J., Bareille G., Drouineau H., Tabouret H., Taverny C., Boisneau C., Berail S., Pécheyran C., Claverie F. and Daverat F., 2019. 80's population-specific compositions of two related anadromous shad species during the oceanic phase determined by microchemistry of archived otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Publié sur le Web 17 juin 2019, <https://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0444> (hal-02175519v1)

Négre P. et Deschamps P., 1996. Natural and Anthropogenic budgets of a small watershed in the Massif Central (France): Chemical and strontium isotopic characterization of water and sediments. *Aquatic geochemistry*, 2: 1-27.

Négre, 1999. Geochemical study of a granitic area – the Margeride mountains, France: Chemical element behavior and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ constraints. *Aquatic geochemistry*, 5: 125-165.

Richard A., Bareille G., Caudron A., Collet M.-A., Dorioz J.-M., Vignon M., 2019. Géochimie des Otolithes comme outil de Détermination de l'Origine Natale (affluents de naissance) de la Truite des

Projet de Collaboration Scientifique ECTRO



grands Lacs Alpains, Léman, Annecy, Bourget, Sautet. Rapport final, projet GODONTLA, Agence Française de la Biodiversité (AFB), 49p, Septembre 2019. (hal-03141171v1)

Steinmann M. and Stille P., 2008. Controls on transport and fractionation of the rare earth elements in stream water of a mixed basaltic-granitic catchment basin (Massif Central, France). *Chemical Geology*, 254: 1-18.

Teichert N., Tabouret H., Lagarde R., Grondin H., 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*, 2018, 27: 834-846.

<https://dx.doi.org/10.1111/eff.12396> (hal-01781978v1)



8. Annexes

*Annexe 1 : liste et localisation des échantillons d'eaux prélevés du 20/06 au 24/06/2022.
Données des paramètres physico-chimiques (T°C, pH, conductivité).*

Rivière	Sites	N° de site	Date	T°C	pH	Cond. (µS/cm)	Remarques	Lat (°N)	Long (°W)
Veronne	1ier pont aval de riom es Montagne	RHU12	20/06/2022	18	6.94	150.9	Aval STEP: Rejets Eaux usées Riom Es Montagne, Cond. Élevée!	45.29507	2.66919
Petite RHUE	Pont de Chapsal	RHU11	20/06/2022	18.4	7.53	112.4	Eau relativement claire	45.31178	2.67780
R. de Jointy	lieu dit ageades	RHU10	20/06/2022	15.7	7.54	114.3	Eau relativement claire	45.33406	2.67985
Petite RHUE	Coindre	RHU9	20/06/2022	17.4	7.43	119.1	Eau relativement claire	45.35142	2.66270
Grande RHUE	Coindre (50 m amont conf. Petite Rhue)	RHU13	20/06/2022	17.5	7.77	101.6	Eau relativement claire - peu de courant	45.35142	2.66270
R. St-Amandin	Amont pont au niveau du cimetière	RHU17	20/06/2022				Eau relativement claire	45.34232	2.69269
Grande RHUE	Condat, au niveau du lac	RHU21	20/06/2022	20.4	7.62	110.7	Eau relativement claire	45.33533	2.75432
Grande RHUE	En amont du R. Bonjon	RHU22	20/06/2022	19.8	7.82	107	Eau relativement claire	45.34148	2.76512
R. Bonjon	500 m en amont confl. Rhue	RHU23	20/06/2022	18.5	7.66	127	Eau relativement claire	45.33885	2.76468
Santoire	au niveau des gorges	RHU25	20/06/2022	20.7	7.86	124.1	Eau relativement claire	45.31459	2.76744
R. de Bastide	En amont de la confl. Santoire	RHU35	20/06/2022	17.8	7.92	125	Eau relativement claire	45.31473	2.76804
Santoire	Pont de Condat au niveau de la déchetterie, amont RD678	RHU24	20/06/2022	21.1	7.95	131	Eau relativement claire	45.33131	2.75309
R. Clamouze	Cascade d'Entraigue	RHU31	21/06/2022	16.8	7.56	72.2	Eau relativement claire, substrat volcanique	45.41675	2.83432
R. de Groleix	Route de Graffaudeix	RHU32	21/06/2022	17.9	7.56	73.1	Eau relativement claire, substrat volcanique	45.42029	2.84089
R. d'Entraigues	RD30	RHU33	21/06/2022	16.5	7.7	85	Eau relativement claire, substrat volcanique	45.42050	2.84516
Grande RHUE	Egliseneuve d'Entraigues	RHU34	21/06/2022	17.8	7.74	79	Eau relativement claire, substrat volcanique	45.40505	2.86823
R. Loubanère	Lieu dit la Cabane	RHU30	21/06/2022	17.6	7.66	112.2	Eau relativement claire, substrat volcanique	45.38996	2.83133
Grande RHUE	Pont de Chanterelle	RHU29	21/06/2022	18.5	8.02	101.4	Eau relativement claire, substrat volcanique	45.38303	2.81235
Grande RHUE	Amont confluence Loubinoux	RHU28	21/06/2022	18.9	7.95	101.8	Grande Rhue aval loubanère	45.35822	2.79136
R. Loubinoux	500 m amont confluence Rhue	RHU27	21/06/2022	17.4	8.02	108.4	Substrat mixte volc-cristallin	45.35645	2.79321
R. de Monboudif	Lieu dit les Aigues	RHU20	21/06/2022	17.5	7.58	95.4	Eau stagnante, pas de débit!!!	45.36120	2.71971
R. de la Morthe	Aval la Morthe	RHU19	21/06/2022	15	6.8	106.3	Odeur H2S, dépôts rouge ferrugineux?	45.36272	2.71489
Grande RHUE	Coindre, en amont de la centrale hydroélectrique	RHU18	21/06/2022	19.5	7.64	102.2	En remplacement aval Essard, proche du site RHU13	45.35551	2.66865
Tarentaine	Aval pont Champs sur Tarentaine, au niveau de la Piscine	RHU3	22/06/2022	19.4	7.93	66.5	Eau relativement claire, substrat cristallin	45.39024	2.54743
Tarentaine	Amont confluence de la Grande Rhue	RHU2	22/06/2022	19.1	7.8	67.4	Eau relativement claire, substrat cristallin	45.37950	2.54023
Grande RHUE	aval confluence de la Tarentaine	RHU1	22/06/2022	19.8	8.43	94	Eau relativement claire	45.37658	2.53370
Grande RHUE	Lieu dit le Chambon, au niveau du pont	RHU5	22/06/2022	18.4	8.3	104.1	Peu de courant	45.36854	2.57876
R. du Taurons	lieu dit pont de Coindre	RHU16	23/06/2022	15.8	8.26	59.6	Substrat cristallin	45.36586	2.67607
R. du Gabacut	Aval gorges du cornillou	RHU15	23/06/2022	16.5	8.29	70.8	Substrat cristallin et galets volcaniques, le long de la route	45.35763	2.68025
Grande RHUE	Juste en amont du pont de Castellane	RHU14	23/06/2022	16.2	8.43	107.1	Eau relativement claire	45.35732	2.67300
R. d'Embort	village d'embort, amont du pont	RHU7	23/06/2022	14.8	8.06	55.4	Substrat cristallin	45.37445	2.62875
Grande RHUE	au niveau du Pont d'embort	RHU6	23/06/2022	16.9	8.17	106	Substrat cristallin	45.36889	2.62564
R. de la Scie	Embort, au niveau du pont chemin forestier	RHU8	23/06/2022	16.1	7.67	106.7	débit faible, eau claire	45.36348	2.61973
Couze Pavin	aval Besse, au niveau de la STEP	RHU36	23/06/2022	15.6	7.48	109.4	Substrat volcanique	45.51471	2.92886
R. de Montirin	au milieu de Champs sur Tarentaine	RHU4	24/06/2022	13.1	8.17	82.6	Eau relativement claire	45.39483	2.56167

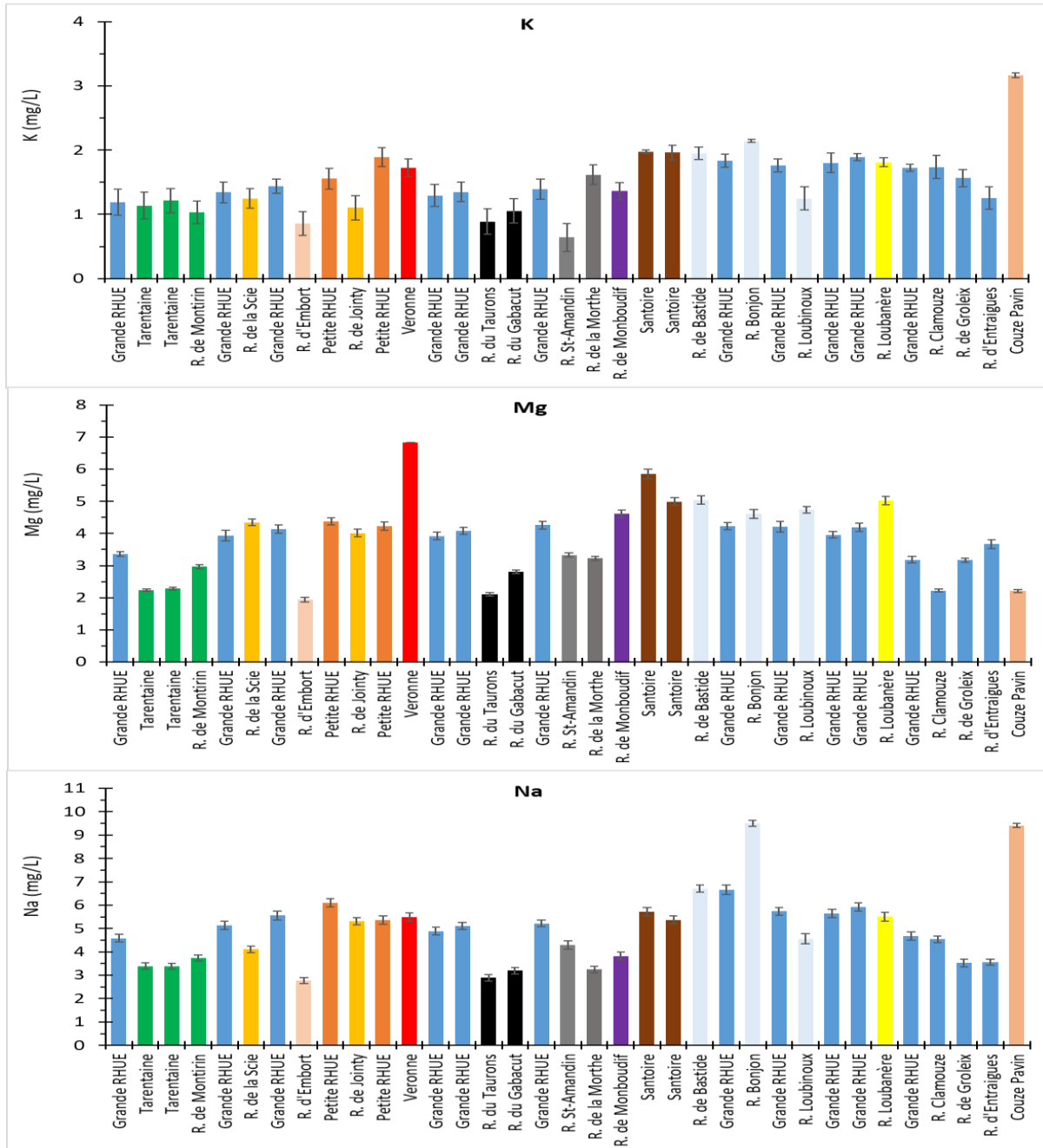


Annexe 2 : Concentrations en Ba ($\mu\text{g/L}$), Ca (mg/L), Sr ($\mu\text{g/L}$), K (mg/L), Mg (mg/L), Mn ($\mu\text{g/L}$) et Na (mg/L) dans les échantillons d'eaux prélevés dans la Rhue et ses affluents en juin 2022.

N° de sites	Rivières	Lat (°N)	Long (°W)	Ba		Ca		Sr		K		Mg		Mn		Na	
				$\mu\text{g/L}$	SD	mg/L	SD	$\mu\text{g/L}$	SD	mg/L	SD	mg/L	SD	$\mu\text{g/L}$	SD	mg/L	SD
RHU1	RHUE	45.37658	2.53370	9.0	1.2	7.3	0.5	67.3	1.4	1.2	0.2	3.4	0.1	0.8	0.2	4.6	0.2
RHU2	Tarentaine	45.37950	2.54023	14.2	1.8	5.1	0.4	41.4	2.3	1.1	0.2	2.2	0.0	0.8	0.2	3.4	0.1
RHU3	Tarentaine	45.39024	2.54743	14.3	1.4	5.0	0.3	43.3	2.7	1.2	0.2	2.3	0.0	3.1	0.4	3.4	0.1
RHU4	R. de Montirin	45.39483	2.56167	18.5	1.6	6.6	0.2	33.9	2.8	1.0	0.2	3.0	0.1	2.2	0.3	3.7	0.1
RHU5	RHUE	45.36854	2.57876	9.8	1.2	8.5	0.4	81.4	1.1	1.3	0.2	3.9	0.2	2.0	0.1	5.1	0.2
RHU8	R. de la Scie	45.36348	2.61973	12.1	1.1	9.9	0.1	62.6	0.4	1.2	0.2	4.3	0.1	nd		4.1	0.1
RHU6	RHUE	45.36889	2.62564	11.1	0.8	8.7	0.3	86.0	1.0	1.4	0.1	4.1	0.1	13.8	1.0	5.6	0.2
RHU7	R. d'Embort	45.37445	2.62875	5.4	0.4	4.8	0.2	35.8	0.4	0.9	0.2	1.9	0.1	0.3	0.1	2.8	0.1
RHU9	Petite RHUE	45.35142	2.66270	11.4	1.2	9.6	0.3	91.0	3.1	1.6	0.2	4.4	0.1	1.6	0.1	6.1	0.2
RHU10	R. de Jointy	45.33406	2.67985	8.2	1.3	10.2	0.2	77.8	2.6	1.1	0.2	4.0	0.1	nd	0.2	5.3	0.1
RHU11	Petite RHUE	45.31178	2.67780	14.3	1.6	8.6	0.5	101.9	1.1	1.9	0.1	4.2	0.1	5.0	0.7	5.4	0.2
RHU12	Veronne	45.29507	2.66919	13.3	1.4	11.9	0.1	126.8	2.8	1.7	0.1	6.8	0.0	17.9	1.7	5.5	0.2
RHU13	Grande RHUE	45.35142	2.66270	9.4	1.1	8.1	0.4	77.4	1.3	1.3	0.2	3.9	0.1	3.5	0.1	4.9	0.2
RHU18	Grande RHUE	45.35551	2.66865	9.3	0.8	8.4	0.4	81.2	1.2	1.3	0.2	4.1	0.1	6.0	0.3	5.1	0.2
RHU16	R. du Taurons	45.36586	2.67607	8.1	1.1	4.9	0.3	37.7	0.4	0.9	0.2	2.1	0.0	1.0	0.1	2.9	0.1
RHU15	R. du Gabacut	45.35763	2.68025	9.4	1.2	5.8	0.3	49.6	3.8	1.1	0.2	2.8	0.1	1.1	0.0	3.2	0.1
RHU14	Grande RHUE	45.35732	2.67300	10.4	1.1	8.7	0.4	86.8	1.3	1.4	0.2	4.3	0.1	4.7	0.0	5.2	0.1
RHU17	R. St-Amandin	45.34232	2.69269	6.9	0.9	8.6	0.4	53.0	1.9	0.6	0.2	3.3	0.1	5.6	0.6	4.3	0.2
RHU19	R. de la Morthe	45.36272	2.71489	20.7	1.9	6.9	0.3	55.5	3.2	1.6	0.2	3.2	0.1	646.2	56.9	3.2	0.1
RHU20	R. de Monboudif	45.36120	2.71971	16.2	1.2	7.9	0.3	83.3	0.8	1.4	0.1	4.6	0.1	56.8	5.4	3.8	0.2
RHU24	Santoire	45.33131	2.75309	13.2	0.6	11.2	0.3	120.0	2.3	2.0	0.0	5.9	0.1	2.2	0.1	5.7	0.2
RHU25	Santoire	45.31459	2.76744	10.6	1.3	9.9	0.1	116.0	1.3	2.0	0.1	5.0	0.1	3.0	0.4	5.4	0.2
RHU35	R. de Bastide	45.31473	2.76804	14.0	1.3	8.7	0.4	90.7	2.3	1.9	0.1	5.0	0.1	nd		6.7	0.2
RHU21	Grande RHUE	45.33533	2.75432	11.5	1.3	8.1	0.3	84.8	0.8	1.8	0.1	4.2	0.1	4.7	0.2	6.7	0.2
RHU23	R. Bonjon	45.33885	2.76468	15.3	0.7	8.7	0.3	91.1	2.3	2.1	0.0	4.6	0.1	0.6	0.2	9.5	0.1
RHU22	Grande RHUE	45.34148	2.76512	11.0	1.5	8.0	0.3	83.8	1.4	1.8	0.1	4.2	0.2	10.6	0.6	5.7	0.2
RHU27	R. Loubinoux	45.35645	2.79321	10.8	1.2	8.7	0.5	95.4	2.5	1.2	0.2	4.7	0.1			4.6	0.2
RHU28	Grande RHUE	45.35822	2.79136	9.9	1.1	7.4	0.4	75.0	0.6	1.8	0.2	4.0	0.1	1.2	0.3	5.6	0.2
RHU29	Grande RHUE	45.38303	2.81235	12.0	0.5	7.7	0.2	78.1	0.9	1.9	0.1	4.2	0.1	1.8	0.1	5.9	0.2
RHU30	R. Loubanère	45.38996	2.83133	7.8	0.7	9.1	0.4	90.6	2.5	1.8	0.1	5.0	0.1	3.3	0.2	5.5	0.2
RHU34	Grande RHUE	45.40505	2.86823	8.1	0.5	5.7	0.1	63.0	0.7	1.7	0.1	3.2	0.1	2.6	0.1	4.7	0.2
RHU31	R. Clamouze	45.41675	2.83432	5.2	1.4	4.6	0.3	47.9	2.3	1.7	0.2	2.2	0.0	1.7	0.0	4.5	0.1
RHU32	R. de Groleix	45.42029	2.84089	7.1	0.9	5.7	0.3	60.3	2.1	1.6	0.1	3.2	0.1	3.6	0.2	3.5	0.2
RHU33	R. d'Entraigues	45.42050	2.84516	7.5	1.5	6.6	0.3	68.3	2.6	1.3	0.2	3.7	0.1	2.6	0.3	3.6	0.1
RHU36	Couze Pavin	45.51471	2.92886	5.0	0.8	6.1	0.3	44.4	3.1	3.2	0.0	2.2	0.0	3.7	0.0	9.4	0.1



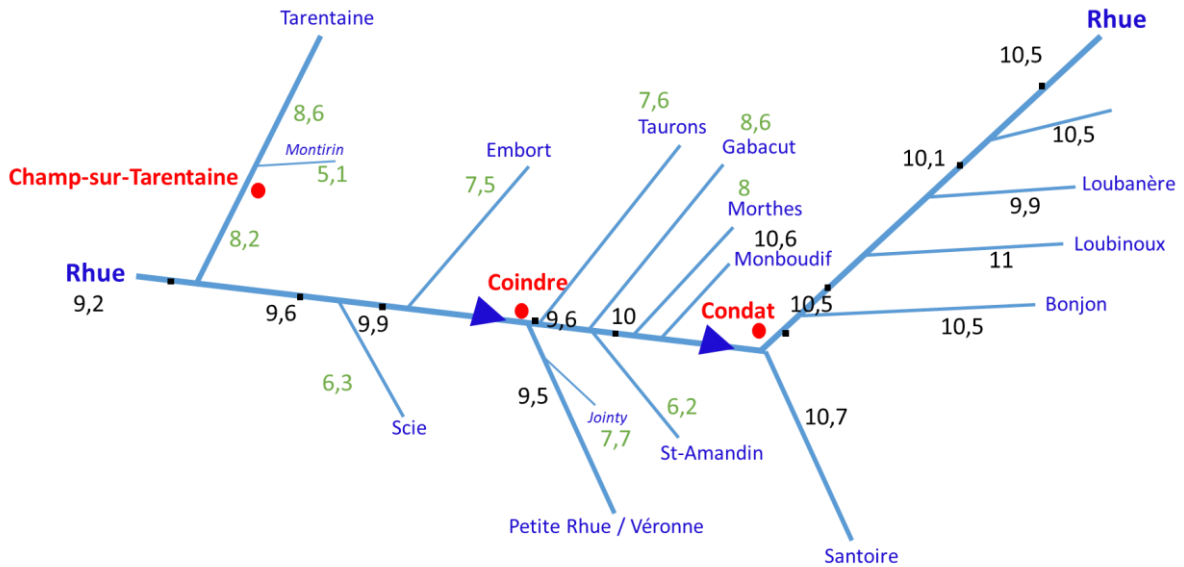
Annexe 3 : distribution des éléments Potassium (K), Magnésium (Mg) et Sodium (Na) dans la Rhue (bleu foncé) et ses affluents (autres couleurs)



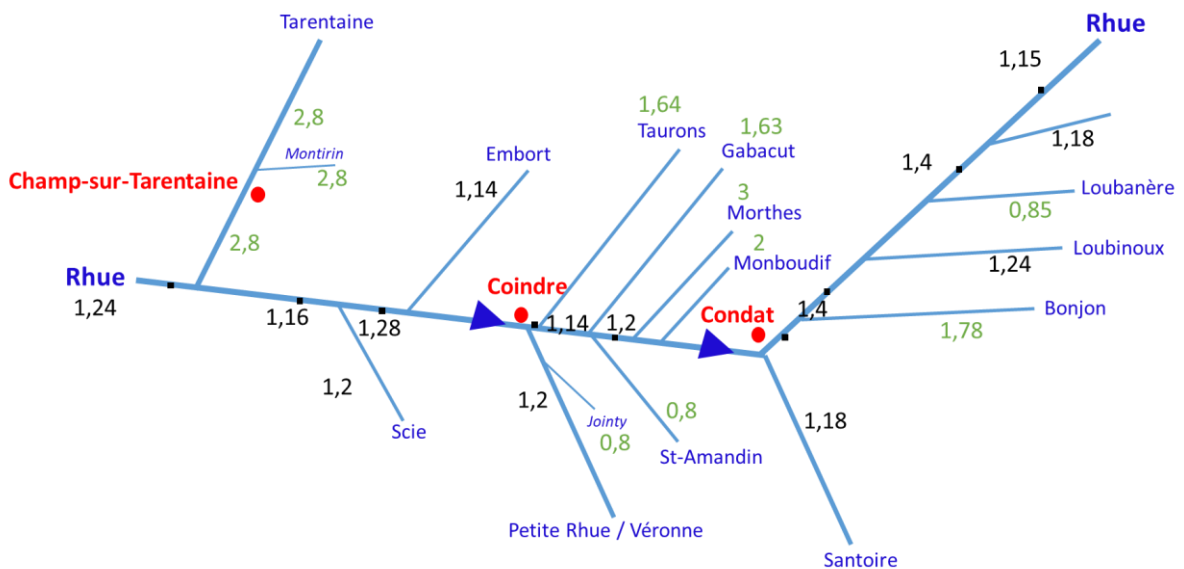


Annexe 4 : distribution spatiale amont-aval sous forme de carte schématique des marqueurs d'habitat Sr/Ca, Ba/Ca et ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. En vert les affluents potentiellement discriminables de la Rhue.

Sr/Ca



Ba/Ca (/1000)





$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

