

ANALYSE DES PFAS DANS LES POISSONS DU LÉMAN

PFAS ANALYSIS IN FISH FROM LAKE GENEVA

CAMPAGNE 2024

PAR

Mathieu COSTER¹, Silwan DAOUK², Benoit FERRARI³

¹ OFFICE CANTONAL DE L'EAU, AVENUE DE SAINTE-CLOTILDE 25, 1205 GENÈVE

² ASSOCIATION SUISSE DES PROFESSIONNELS DE LA PROTECTION DES EAUX (VSA), CHEMIN DE MORNEX 3, 1003 LAUSANNE

³ CENTRE ECOTOX/OEKOTOXZENTRUM, EPFL-ENAC-IIE-GE, STATION 2, 1015 LAUSANNE

RÉSUMÉ

La campagne 2024 d'analyse des PFAS dans les poissons permet d'obtenir une mise à jour de la situation et de compléter les données de concentrations en PFAS dans les poissons du Léman. Au total, 119 poissons ont été prélevés, lors de l'échantillonnage du peuplement piscicole du Léman qui s'est déroulé du 2 au 26 septembre 2024, ainsi que par des prélèvements dans les commerces par les chimistes cantonaux romands. Les filets, les carcasses et les foies ont été analysés séparément, et les concentrations dans le poisson entier recalculées à partir de ces dernières. Les acides carboxyliques sont fréquemment détectés avec 93 % des échantillons positifs pour les PFAS entre C8 et C14. Toutefois, le PFOS, de la famille des acides sulfoniques, montre des concentrations qui dépassent de plus d'un ordre de grandeur celles des autres composés. Les produits de substitution (GenX, DONA et F53B) n'ont été quantifiés dans aucun des échantillons. Sur l'ensemble des filets analysés, des lottes, brochets et truites dépassaient au moins un seuil réglementaire. Selon sa norme de qualité environnementale, qui tient compte de l'empoisonnement secondaire, les concentrations de PFOS la dépassent dans 19 des 44 échantillons de poissons entier, soit 43 %. La comparaison avec les données historiques montre une tendance temporelle à la baisse pour le PFOS, mais une tendance temporelle à l'augmentation dans les filets de perche pour certains PFAS à chaîne longue.

ABSTRACT

The 2024 campaign to analyze PFAS in fish provides an update on the current situation and completes the data on PFAS concentrations in fish in Lake Geneva. A total of 119 fish were sampled, during the sampling of the Lake Geneva fish population which took place from September 2 to 26, 2024, as well as samples taken in shops by the chemists of the French-speaking cantons. Muscles, carcasses and livers were analyzed separately, and concentrations in whole fish recalculated from these. Carboxylic acids were frequently detected, with 93 % of samples positive for PFAS between C8 and C14. However, PFOS, a member of the sulfonic acid family, shows concentrations that exceed those of the other compounds by more than an order of magnitude. Substitutes (GenX, DONA and F53B) were not quantified in any of the samples. Of all the fish analyzed, a few burbot, pike and trout exceeded at least one of the regulatory thresholds. According to its environmental quality standard, which takes secondary poisoning into account, PFOS concentrations exceed this standard in 19 of the 44 whole fish samples, i.e 43 %. Comparison with previous data shows a downward trend over time for PFOS, but an upward trend over time in perch fillets for certain long-chain PFAS.

1. INTRODUCTION

Depuis les dernières campagnes d'analyse des substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) dans les poissons réalisées par la CIPEL (2008, 2012, 2018 et 2020), le contexte a changé. Dès début 2024 un alignement de la législation suisse sur la législation européenne fixe des teneurs en PFAS dans les denrées alimentaires, dont les poissons. Pour la CIPEL l'objectif est de pouvoir à la fois répondre aux questions environnementales (niveau de contamination des organismes et risque d'empoisonnement secondaire, évolution au cours du temps), mais aussi d'apporter sa contribution à la question sanitaire en complément aux études réalisées par les autorités compétentes. C'est pourquoi des analyses ont été réalisées dans le poisson entier et dans le filet. L'analyse dans les filets permet d'apporter des éléments de diagnostic sanitaire mais également de dresser l'évolution de la contamination des poissons du Léman depuis les premières mesures de ce type de contaminants en 2008. Cette analyse vient alimenter l'information acquise à l'échelle de l'Europe et permet également une comparaison entre lacs. Elle a également pour avantage de tenter de consolider la relation entre les concentrations dans le filet et celles dans le poisson entier (Babut et al., 2019). Ainsi, cette étude permet d'actualiser et compléter les données de concentrations en PFAS dans les poissons du Léman et permet aussi d'apporter des éléments de réponses aux questions récentes posées par la présence des PFAS dans les poissons, tant du point de vue sanitaire qu'environnemental.

2. MÉTHODES DE PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES

Les prélèvements ont eu lieu lors de l'échantillonnage du peuplement piscicole du Léman réalisé par l'OFB et les cantons suisses du 2 au 26 septembre 2024 pour 52 poissons. Les chimistes cantonaux romands se sont par ailleurs procuré un total de 67 poissons du Léman auprès des pêcheurs professionnels entre mai et décembre 2024. Les poissons prélevés par l'OFB ont été analysés par le Laboratoire d'Étude des Résidus et Contaminants dans les Aliments (LABERCA) à Nantes et les poissons prélevés par les chimistes cantonaux par le laboratoire du chimiste cantonal vaudois. Le Tableau 1 présente les différentes espèces échantillonnées par la campagne de la CIPEL et celle des chimistes cantonaux, ainsi que les différentes fractions analysées. Les stratégies de prélèvement et les méthodes d'analyses sont détaillées en Annexe.

*Tableau 6 : Fractions analysées dans les poissons prélevés par la CIPEL et les chimistes cantonaux. *Foie retiré de la carcasse uniquement pour les espèces où le foie est analysé (gardon et lotte).*

*Table 1 : Fractions analyzed in fish sampled by CIPEL and cantonal chemists *Liver removed from the carcass only for species where the liver is analyzed (roach and burbot).*

		Analyse du filet (chair musculaire sans peau) Selon directive européenne	Analyse de la carcasse (poisson entier sans filet ni foie*)	Analyse du foie	Nombre de poissons	Total
Gardon	CIPEL	x	x	x	11	17
	Chimistes cantonaux	x			6	
Perche	CIPEL	x	x		19	58
	Chimistes cantonaux	x			39	
Omble	CIPEL	x	x		1	3
	Chimistes cantonaux	x			2	
Truite	CIPEL	x	x		2	4
	Chimistes cantonaux	x			2	
Corégone	CIPEL	x	x		8	16
	Chimistes cantonaux	x			8	
Brochet	CIPEL	x			3	11
	Chimistes cantonaux	x			8	
Silure	Chimistes cantonaux	x			1	1
Lotte	CIPEL	x	x	x	8	8
Brème	Chimistes cantonaux	x			1	1

3. RÉSULTATS DANS LE POISSON ENTIER

3.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

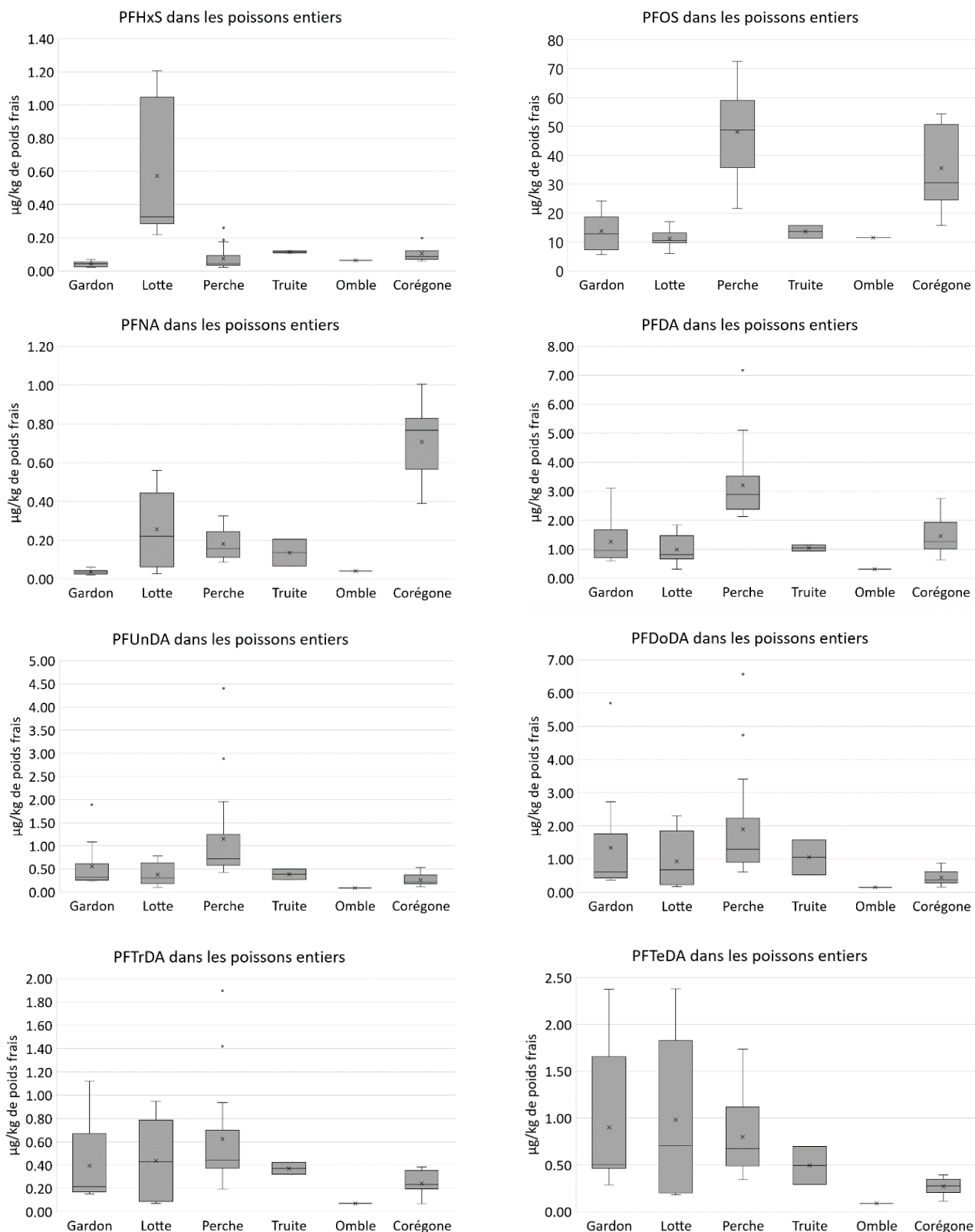


Figure 1: Distributions des concentrations des principaux PFAS quantifiés dans les différentes espèces. Attention les échelles sont différentes selon les composés.

Figure 1: Concentration distributions of the main PFAS quantified in different species. Please note that the scales differ depending on the substances.

Les concentrations des principaux PFAS quantifiés dans cette étude sont présentées dans la Figure 1. Sur les 26 composés analysés, 18 sont détectés au moins une fois. La famille des acides carboxyliques est nettement surreprésentée en termes de fréquence de détection avec 93 % des échantillons positifs pour les chaînes entre 8 et 14 atomes de carbones. Le composé retrouvé en plus grande concentration reste le PFOS de la famille des acides sulfoniques. Ses concentrations dépassent de plus d'un ordre de grandeur celles des autres composés (Figure 1), ce qui est cohérent avec les échantillons d'eau analysés (Plagellat et al. 2025). En effet, il est retrouvé dans tous les échantillons analysés, ce qui confirme une bioaccumulation de ce composé dans la chair des poissons, largement exposés malgré son interdiction et des restrictions d'usage depuis 2011. Les produits de substitution (GenX, DONA et F53B) n'ont été quantifiés dans aucun des échantillons de cette campagne.

Par reconstitution des résultats d'analyse des différentes fractions on obtient la concentration dans le poisson entier selon l'équation suivante :

$$C_{\text{Poisson entier}} [\mu\text{g/kg}] = \frac{C_{\text{Carcasse}} \times m_{\text{Carcasse}} + C_{\text{Filet}} \times m_{\text{Filet}} + C_{\text{Foie}} \times m_{\text{Foie}}}{m_{\text{Totale}}}$$

3.2 RÉSULTATS DANS LES DIFFÉRENTES FRACTIONS DES POISSONS

Si l'on compare les concentrations des différentes fractions analysées, le filet apparaît comme la fraction la moins contaminée par les PFAS. En effet, toutes espèces confondues, le rapport moyen entre les concentrations dans la carcasse et celles dans le filet est de 3.79 ± 2.59 (2σ). La Figure 2 présente les concentrations de PFOS dans le filet, la carcasse et le foie des gardons et lottes. Pour les deux espèces la carcasse est significativement plus contaminée que le filet (P respectivement de 0.0004 et 0.0008), alors qu'entre la carcasse et le foie la différence n'est statistiquement significative que pour le gardon ($P = 0.015$). Le profil de concentration dans les différentes fractions est similaire pour l'ensemble des PFAS analysés.

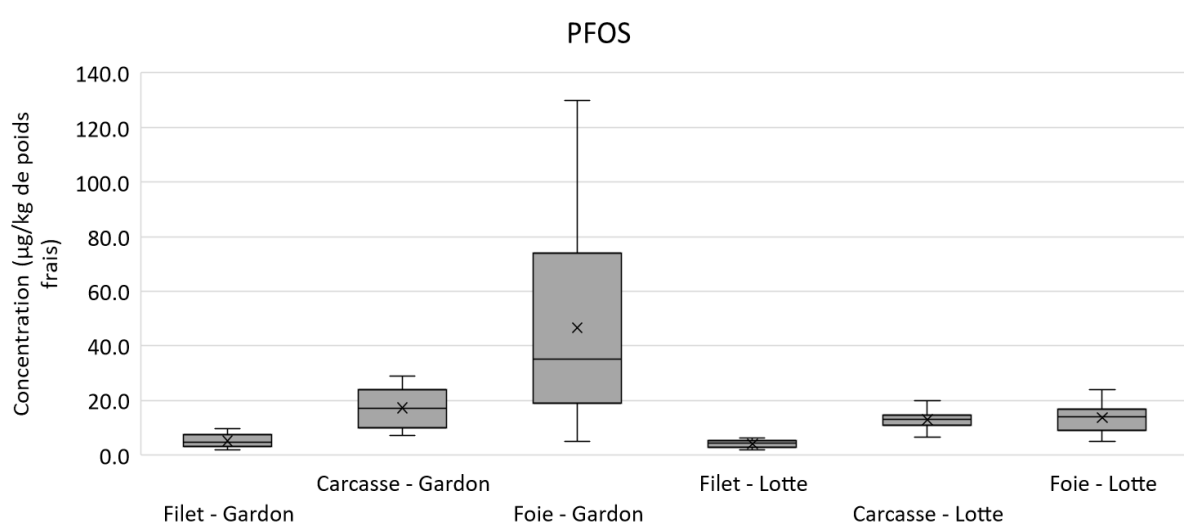


Figure 2 : Concentrations en PFOS dans les différentes fractions analysées dans les gardons et lottes.

Figure 2 : PFOS concentrations in the different analyzed fractions in roach and burbot.

3.3 CORRÉLATION ENTRE LES CONCENTRATIONS DANS LE FILET ET DANS LE POISSON ENTIER

Lors de la campagne de 2018 (Babut et al. 2019) des régressions linéaires avaient été testées sur les concentrations estimées dans l'organisme entier et la concentration dans les filets pour le gardon et la lotte. Ces régressions avaient été déterminées comme très significatives pour le PFOS, PFDA, PFUnDA, PFDODA chez le gardon et la lotte, de même que pour le PFHxS et le PFNA chez la lotte. En 2024, les régressions linéaires présentent globalement les mêmes significativités qu'en 2018 mais les pentes des régressions pour le gardon semblent significativement plus élevées (trop peu de paires pour réaliser un test statistique) alors qu'elles sont similaires pour la lotte ($P = 0.07$, test de Wilcoxon). Comme en 2018 les ordonnées à l'origine sont toutes proches de zéro sauf pour le PFOS. Pour le corégone les concentrations dans le poisson entier et dans le filet ne présentent pas de corrélation claire. Pour la campagne de 2024 les pentes présentent une médiane de 2.47 ± 0.71 (2σ) et les ordonnées à l'origine (hors PFOS) une médiane de 0.04 ± 0.19 (2σ) qui pourraient être utilisée pour une première estimation de la concentration dans le poisson entier à partir de la concentration dans le filet. Pour le PFOS il faut tenir compte d'une ordonnée à l'origine de 1.51 pour les gardons et lottes et 12.8 pour les perches.

Tableau 2 : Paramètres des régressions linéaires entre concentrations dans le poisson entier et concentrations dans le filet en 2018 et 2024.

Table 2 : Linear regressions parameters between whole fish concentrations and fillets concentrations in 2018 and 2024.

			Pente	Constante	R ²
Gardons	PFOS	2018	1.71	1.96	0.919
		2024	2.41	1.51	0.951
	PFDA	2018	1.64	0.28	0.885
		2024	2.83	0.04	0.954
	PFUnDA	2018	1.97	0.01	0.938
		2024	2.97	0.00	0.985
	PFDODA	2018	1.89	0.03	0.950
		2024	2.96	0.04	0.990
Lottes	PFHxS	2018	1.61	-0.01	0.943
		2024	1.68	0.07	0.990
	PFOS	2018	1.72	1.48	0.866
		2024	2.24	1.51	0.849
	PFNA	2018	2.07	-0.06	0.923
		2024	2.31	0.00	0.985
	PFDA	2018	2.53	-0.49	0.965
		2024	2.39	0.04	0.979
	PFUnDA	2018	2.65	-0.25	0.907
		2024	2.53	0.00	0.986
Perches	PFDODA	2018	2.14	-0.17	0.979
		2024	2.63	0.00	0.994
	PFHxS	2024	2.99	0.00	0.928
	PFOS	2024	2.39	12.8	0.785
	PFNA	2024	2.49	0.03	0.893
	PFDA	2024	2.81	0.35	0.896
	PFUnDA	2024	2.94	0.04	0.979
	PFDODA	2024	2.82	0.12	0.988

4. RÉSULTATS DANS LE FILET

4.1 LÉGISLATION SANITAIRE

Les législations suisses (Ordonnance sur les contaminants, OCont) et européennes (Règlement 2023/915) imposent des seuils dans la chair des poissons pour les composés PFHxS, PFOS, PFOA et PFNA ainsi que pour la somme des quatre substances. Des seuils différents sont imposés en fonction des espèces. Le Tableau 3 résume ces seuils pour les espèces du Léman concernées.

Tableau 3 : Résumé des seuils imposés par les législations européennes et suisses pour les espèces concernées par cette étude (valeurs dans les filets).

Table 3 : Summary of thresholds imposed by European and Swiss legislation for the species covered by this study (values for fillet).

Substances perfluoroalkylées : teneur maximale (µg/kg de poids à l'état frais)					
Espèces	PFOS	PFOA	PFNA	PFHxS	Σ PFOS, PFOA, PFNA & PFHxS
Truite, brochet, lotte, silure	7	1	2.5	0.2	8
Perche, Omble, gardon, Corégones	35	8	8	1.5	45

4.2 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

La somme des quatre PFAS réglementés (PFOS, PFOA, PFNA et PFHxS) participant en moyenne à 83 % de la somme des PFAS mesurés, et le PFOS seul participe en moyenne à hauteur de 81 % à la somme des concentrations en PFAS dans le filet (Figure 3). Ces résultats, avec des concentrations plus importantes pour le PFOS dans les filets de perches, confirment les résultats d'études précédentes (Jaus et al. 2023, Soudani et al. 2024).

Sur l'ensemble des 119 poissons analysés, trois lottes dépassaient le seuil réglementaire pour la concentration en PFHxS, et cinq brochets et deux truites dépassaient le seuil réglementaire pour le PFOS (Figure 4). Les paramètres PFOA et PFNA ne posent pas de problèmes particuliers, l'ensemble de leurs concentrations mesurées sont largement en dessous des seuils réglementaires.

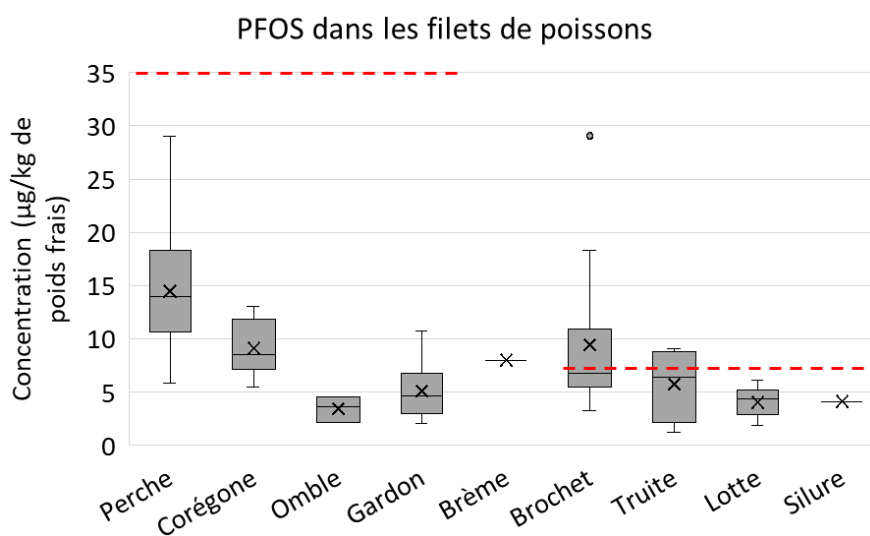


Figure 3 : Concentrations en PFOS dans les filets de l'ensemble des poissons analysés. Le seuil légal est représenté par les pointillés rouges.

Figure 3 : PFOS concentrations in the filets of all the fish analyzed. Legal threshold represented by the red dotted lines.

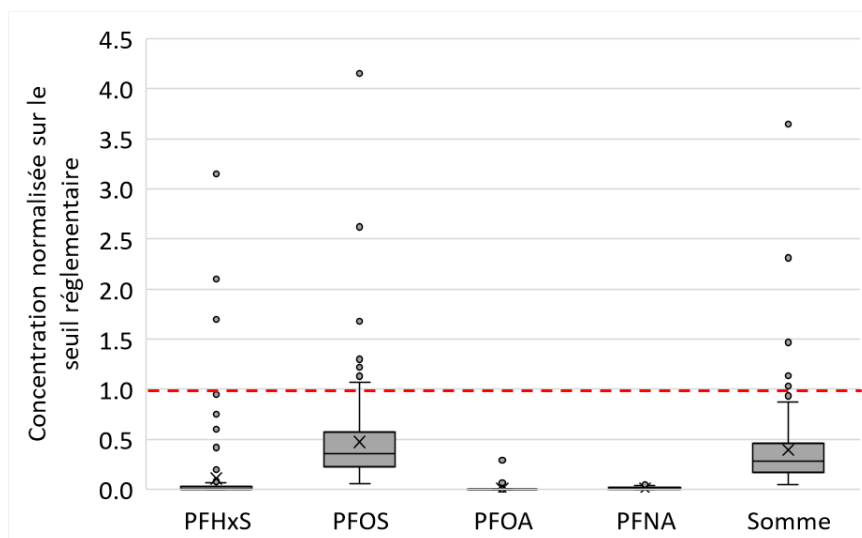


Figure 4 : Distributions des concentrations normalisées sur le seuil réglementaire pour les 4 composés et leur somme. Le seuil légal est représenté par les pointillés rouges.

Figure 4 : Concentration distributions normalized to the regulatory threshold for the 4 compounds and their sum. Legal threshold represented by the red dotted lines.

4.3 NIVEAUX DE CONTAMINATION EN FONCTION DE LA MASSE

Pour les couples espèce - composé présentant les plus grandes dispersions de concentrations dans le poisson entier (Figure 1), une analyse des niveaux de contamination en fonction de la masse totale des poissons a été réalisée.

Pour les lottes on constate une corrélation statistiquement significative ($0.01 < p < 0.038$, régression transformée Log_{10}) entre la masse et les concentrations de PFHxS, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, tous à des concentrations plus importantes dans les trois individus les plus petits (Figure 5). La masse des perches échantillonnées varie de 20 à 325 g et pour cette gamme de masse il n'y a pas de tendance qui se dégage pour expliquer la dispersion des concentrations en PFOS et PFTeDA en accord avec les observations de Waldetoft et al. (2024) et Soudani et al. (2024). En revanche, Soudani et al. (2024) ont mis en évidence des corrélations entre les concentrations de certaines PFAS dans les filets de truites provenant de plusieurs lacs suisses et la taille des truites. Cette corrélation était positive pour PFBS, PFDA et PFHxS et négative pour PFPeA. Dans le cas du PFHxS, nous pouvons donc observer des résultats contraires entre les lottes et les truites.

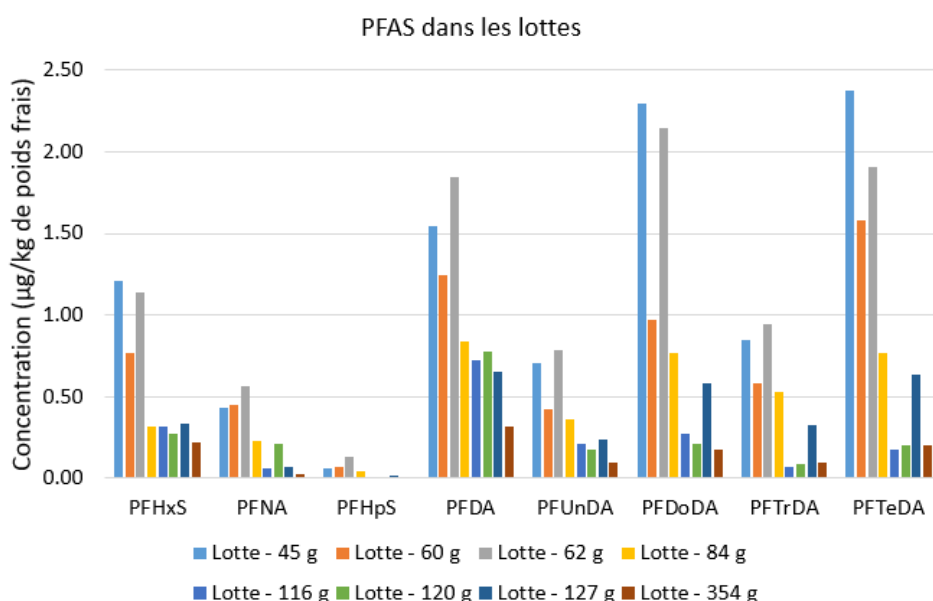


Figure 5 : Concentrations en PFAS dans les lottes par ordre croissant de masse corporelle hors PFOS.

Figure 5 : PFAS concentrations in monkfish in ascending order of body mass excluding PFOS.

4.4 RÉPARTITION SPATIALE

Cette étude a plutôt été dimensionnée pour répondre à la question de la variabilité inter-espèce, néanmoins grâce aux échantillons des chimistes cantonaux il est possible de réaliser une analyse spatiale pour les filets de perches pour lesquels suffisamment de résultats sont disponibles. Sur la base d'un test statistique de Kruskal-Wallis les échantillons prélevés dans la zone de Morges / Vidy sont significativement plus contaminés en PFOS ($P = 0.048$) que ceux des trois autres secteurs (Figure 6).

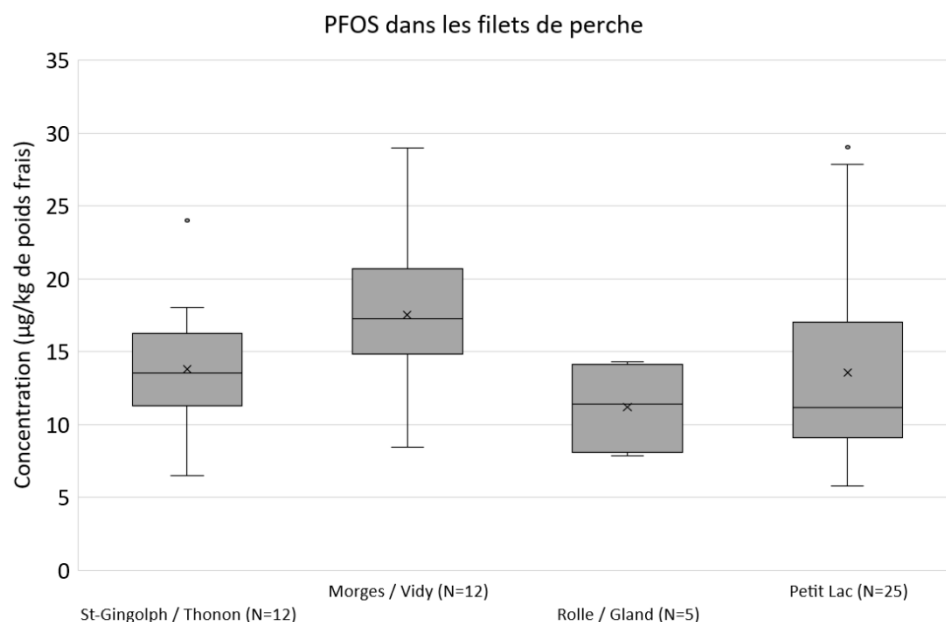


Figure 6 : Concentrations en PFOS dans les filets de perche en fonction de leur lieu de pêche.

Figure 6 : PFOS concentrations in perch fillets depending on where they were fished.

4.5 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS AVEC D'AUTRES LACS

Les concentrations mesurées dans les poissons du Léman en 2024 sont similaires à celles mesurées dans les poissons d'autres lacs (Jaus et al. 2023, Junghans et al. 2024, Soudani et al. 2024, Canton de Berne 2025). Le PFOS est détecté dans tous les échantillons de poissons et avec des concentrations plus élevées que les autres PFAS, ce qui était aussi le cas dans les autres lacs périalpins suisses et italiens (Valsecchi et al. 2021). En revanche, des concentrations de PFAS globalement plus faibles sont mesurées dans les lacs alpins de plus haute altitude (Jaus et al. 2023, Valsecchi et al. 2021). La perche est l'espèce qui montre les concentrations médianes en PFOS, PFOA, PFHxS et PFNA les plus élevées dans les lacs périalpins (Léman, Neuchâtel, Constance, Lugano) (Junghans et al. 2024).

4.6 ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS

Les premiers résultats de PFAS dans les poissons du Léman remontent à 2008 puis 2012, 2018, 2020 et finalement 2024. Les espèces échantillonnées, les composés ainsi que les fractions analysées ne sont pas constants sur l'ensemble des campagnes, il n'est donc pas possible de dresser un profil d'évolution pour l'ensemble des substances dans l'ensemble des matrices des différentes espèces de poissons. Les combinaisons pour lesquelles un profil d'évolution est disponible et d'intérêt sont présentés dans la Figure 7.

Pour les composés réglementés dans la convention de Stockholm, PFOS et PFHxS, nous observons une tendance à la baisse des concentrations dans les filets de l'ensemble des espèces. En revanche, une tendance temporelle semble à l'augmentation dans les filets de perche pour certains PFAS à longue chaîne carbonée: le PFDA et le PFDoDA (données non montrées ici).

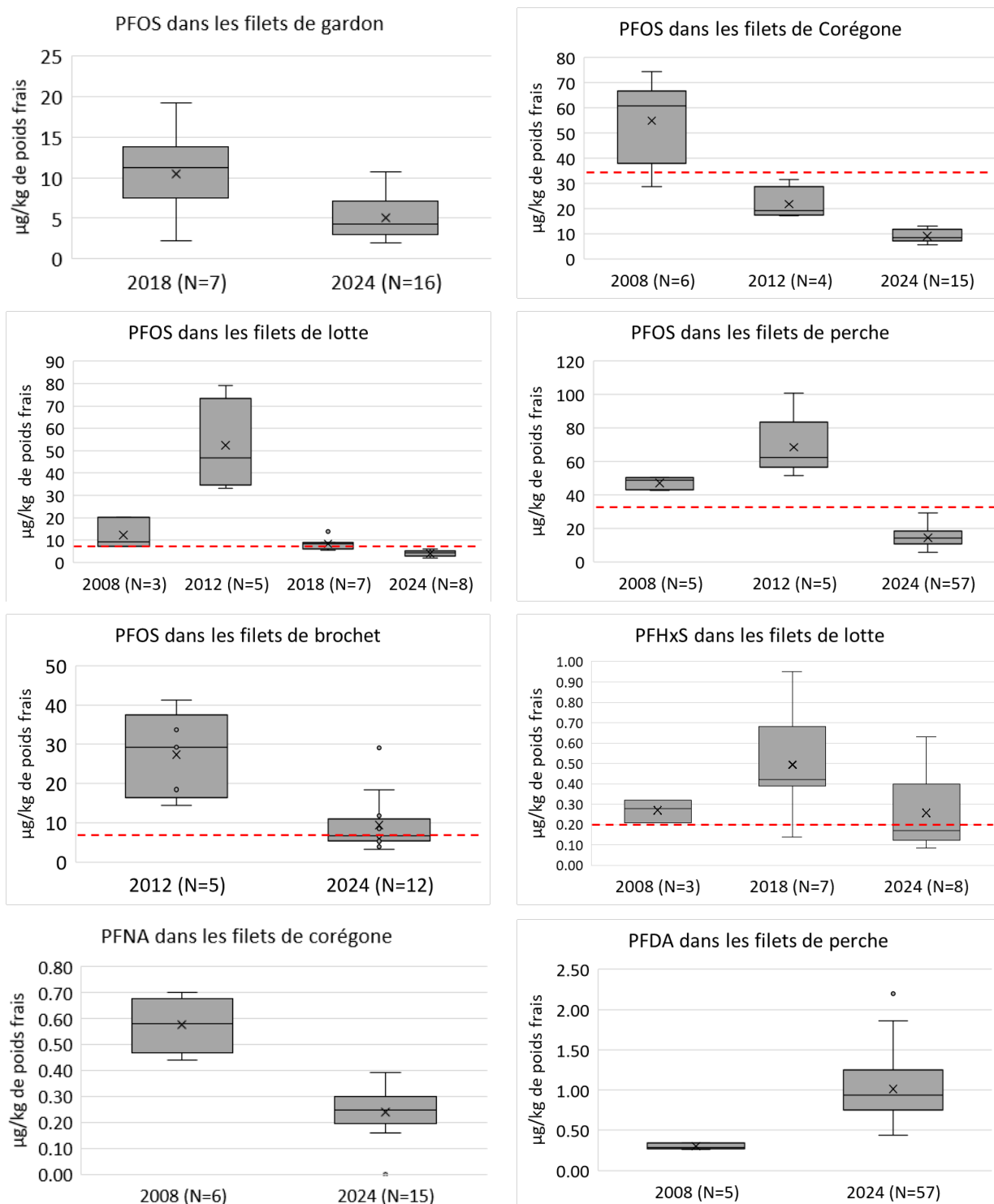


Figure 7 : Évolution temporelle des concentrations de différentes substances dans les filets de différentes espèces. Exigence légale représentée en pointillé rouge.

Figure 7 : Temporal trend of concentrations. Legal threshold represented by the red dotted lines.

4.7 ÉVALUATION ÉCOTOXICOLOGIQUE DES NIVEAUX DE CONTAMINATION

À l'exception du PFOS, il n'existe pas encore de normes ou critères de qualité environnementale (NQE/CQE) pour les substances PFAS dans les eaux de surface. Ces normes proviennent des documents techniques qui soutiennent l'élaboration des NQE dans le contexte de la directive cadre sur l'eau (DCE). Ces documents passent en revue plusieurs domaines couverts par la DCE selon une méthodologie standardisée afin d'établir une NQE pour chaque domaine. La NQE adoptée dans l'Union Européenne est en principe la plus contraignante des valeurs guides. Le PFOS possède une NQE chronique pour les eaux et les sédiments, de respectivement 2 ng/L et 2.7 µg/kg p.s. (Casado-Martinez, 2020). En tenant compte de l'empoisonnement secondaire, c'est-à-dire le risque de bioamplification dans les chaînes trophiques, ces normes sont de 0.65 ng/L et 1.8 µg/kg p.s. pour les eaux et les sédiments, respectivement. Pour les poissons, il existe différentes valeurs guides et notamment une NQE « *secondary poisoning* » ($NQE_{\text{sec-pois}}$) qui protège de l'empoisonnement secondaire les prédateurs en bout de chaîne trophique, sans considérer les humains. Pour le PFOS, la $NQE_{\text{sec-pois}}$ est de 33 µg/kg p.h (Babut et al, 2021). Cette valeur est dépassée dans 19 échantillons, soit 43 % des 44 échantillons de poissons entier analysés lors de cette campagne.

Des nouvelles normes relatives aux concentrations de PFAS mesurées dans le biote sont en cours de discussion à l'échelle européenne. La DCE est en cours de révision et la proposition se base non pas uniquement sur les quatre substances inscrites dans la convention de Stockholm (PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS), mais sur la somme de 25 substances. Pour cela, des facteurs de puissance relatifs (RPF), basés sur la toxicité hépatique du PFOA chez le rat, doivent être appliqués. Par exemple, le PFOS a un RPF de 2 et donc ses concentrations doivent être multipliées par 2 pour évaluer ensuite la somme des 25 PFAS considérés (Bil et al. 2023). Pour le biote, la $NQE_{\text{sec-pois}}$ provisoire est de 22.3 µg/kg de poids humide, en équivalent PFOA pour la somme de 25 PFAS (SCHEER, 2022). La somme des équivalents PFOA pour les six congénères les plus importants de cette étude (PFHxS, PFOS, PFNA, PFDA, PFUnDA et PFDODA) est en moyenne 3.5 fois supérieure à cette valeur seuil qui est dépassée dans 39 échantillons, soit 89 % des 44 échantillons de poissons entier.

De grandes incertitudes persistent sur les impacts de cette contamination sur les traits de vie des poissons, le succès de la reproduction ou le taux de croissance. En effet, peu d'études mettent en relation les concentrations internes dans les poissons avec des effets intrinsèques et il est parfois difficile de relier les concentrations mesurées avec les effets répertoriés dans la littérature. De nombreuses études exposent les organismes à des concentrations élevées par rapport à celles que l'on trouve dans l'environnement et il serait nécessaire d'étudier des concentrations plus faibles, ainsi que les effets additifs (Banyoi et al. 2022). Cependant, il a été démontré que les PFAS peuvent induire des effets chez les poissons comme une certaine toxicité sur la reproduction, un stress oxydatif, une perturbation du métabolisme, une toxicité immunitaire et pour le développement (Lee et al. 2020). Pour certains PFAS on observe de fortes variabilités inter-espèces qu'il conviendra d'investiguer à la lumière des connaissances du comportement de ces espèces. En effet, le processus d'accumulation de ces substances est complexe et présente une grande variabilité inter- et intraspécifique dans les facteurs biologiques (écologie alimentaire, statut trophique, croissance) et chimiques (niveau d'exposition, pharmacocinétique et taux de biotransformation), qui peuvent grandement affecter les concentrations de résidus dans les tissus (Banyoi et al. 2022). Davantage de données écotoxicologiques sont donc nécessaires pour évaluer correctement les effets des concentrations mesurées dans les poissons du Léman.

5. CONCLUSION

Ce rapport présente les résultats d'analyse des PFAS dans les poissons du Léman réalisées en 2024. Les résultats obtenus sur cette campagne d'analyse sont rassurants pour le Léman dans la mesure où les concentrations mesurées semblent généralement diminuer par rapport aux campagnes précédentes. En termes de consommation, seuls trois lottes, cinq brochets et deux truites dépassent les seuils réglementaires sur les 119 filets de poissons analysés. Toutefois, tous les poissons sont contaminés par les PFAS à des concentrations parfois très variables. Dans une récente étude de monitoring du sérum humain dans la population suisse, les niveaux de PFOS ont été associés à la consommation de poisson, en particulier d'espèces d'eau douce (Jaus et al. 2025).

Les résultats montrent des concentrations de PFAS dans la chair des poissons similaires aux poissons analysés dans d'autres lacs périalpins et supérieures aux lacs alpins de plus hautes altitudes. Représentant en moyenne 81 % de la somme des PFAS, le PFOS reste le congénère présent en plus forte concentration dans les poissons du Léman. La tendance temporelle de ses concentrations semble bien se confirmer à la baisse. En revanche, une tendance temporelle semble à l'augmentation dans les filets de perche pour certaines PFAS à longue chaîne carbonée : PFDA et PFDoDA.

Selon les normes écotoxicologiques qui tiennent compte de l'empoisonnement secondaire, le PFOS possède une $NQ_{E_{sec-pois}}$ fixée à 33 µg/kg. Celle-ci est dépassée dans 19 des 44 échantillons de poissons entier (43 %). Si l'on applique la norme figurant dans la proposition de révision de la directive-cadre sur l'eau (DCE) de l'UE, la somme des concentrations de six PFAS mesurés dans cette étude dépasserait dans 39 échantillons (89 %) cette future norme.

Il est important de noter que ces normes sont basées sur la protection des consommateurs secondaires, notamment l'être humain, et il est difficile selon les connaissances actuelles de comprendre la toxicité intrinsèque de ces substances pour les poissons.

REMERCIEMENTS

La CIPEL tient à remercier l'OFEV pour le soutien financier, l'OFB pour la récolte, le conditionnement des poissons et la logistique générale ainsi que l'institut CARRTEL-INRAE pour la collecte des échantillons et leur stockage avant envoi au laboratoire d'analyse. La CIPEL remercie également le LABERCA pour avoir tenu les délais très courts pour le rendu des résultats d'analyse et les SCAV romands pour la mise à disposition de leurs résultats permettant une analyse statistique plus robuste.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR (2015) : Echantillonnage des poissons à l'aide de filets maillants. NF EN 14757, rapport Afnor, 27 p.
- BABUT M., CATTANEO F., RAYMOND J.-C., et al. (2019) : Micropolluants organiques dans les poissons du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2018, 2019, 184-216.
- BABUT M., LOIZEAU J.L., FERRARI B., et al. (2021) : Micropolluants organiques et mercure dans les poissons du Léman. Rapport de la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman, Campagne 2020.
- BANYOI S.-M., PORSERYD T., LARSSON J., et al. (2022) : The effects of exposure to environmentally relevant PFAS concentrations for aquatic organisms at different consumer trophic levels: Systematic review and meta-analyses, *Environmental Pollution*, Volume 315.
- BIL W., EHRLICH V. CHEN G. et al. (2023) : Internal relative potency factors based on immunotoxicity for the risk assessment of mixtures of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in human biomonitoring, *Environment International*, Volume 171.
- CANTON DE BERNE (2025) : Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) in Fischen. Probenkampagne in Zusammenarbeit mit dem Fischereiinspektorat des Kantons Bern und den Berufsfischern von Briener-, Thuner- und Bielersee. Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion. Kantonales Laboratorium Bern.
- CASADO-MARTINEZ C. (2020) : SQC (EQSsed) – Proposal by the Ecotox Centre for: Perfluorooctane Sulfonate (PFOS). Lausanne (CH): Swiss Centre for Applied Ecotoxicology, 47 p.
- DEGIORGI F., GRANDMOTTET J.-P. (1993) : Relations entre la topographie aquatique et l'organisation spatiale de l'ichtyofaune lacustre : définition des modalités spatiales d'une stratégie de prélèvement reproductible. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 329 : 199-220.
- EDDER P., ORTELLI D. (2013) : Micropolluants dans plusieurs espèces de poissons du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2012, 2013, 70-81.
- JAUS A., RHYN P., VALENTINI J. (2023) : Trace Level Analysis of Per- and Polyfluorinated Substances in Fish from Various Regions in Switzerland. *Toxics*. 7;11(11):909.
- JAUS A., FRAGNIERE C., RIOU J., BRUESCHWEILER B. J., BOCHUD M., VON GOETZ N. (2025) : Serum biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the adult population of Switzerland: Results from the pilot phase of the Swiss health study, *Environment International*, Volume 198.
- JUNGHANS M., KROLL A., FERRARI B. (2024) : Complément d'information sur les PFAS : Comparaison de la contamination des poissons du Léman avec celles d'autres lacs. Centre Ecotox.
- LEE J. W., CHOI K., PARK K., et al. (2020) : Adverse effects of perfluoroalkyl acids on fish and other aquatic organisms: A review, *Science of The Total Environment*, Volume 707.
- ORTELLI D., EDDER P. (2009) : Micropolluants dans les poissons et écrevisses du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 2009, 73-89.
- OSAV (2024) : RS 817.02, Ordonnance du DFI sur les teneurs maximales en contaminants (Ordonnance sur les contaminants, OCont).
- SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks), Final Opinion on Draft Environmental Quality Standards for Priority Substances under the Water Framework Directive - PFAS, 18 August 2022.
- SOUDANI M., HEGG L., RIME C., et al. (2024) : Determination of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in six different fish species from Swiss lakes. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Volume 416, 6377-6386.
- UNION EUROPEENNE (2023) : Règlement (UE) 2023/915 de la Commission du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires et abrogeant le règlement (CE) no 1881/2006 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE).
- VALSECCHI S., BABUT M., MAZZONI M., et al. (2021) : Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Fish from European Lakes: Current Contamination Status, Sources, and Perspectives for Monitoring. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Volume 40, Issue 3.
- WALDETOFT H., KARLSSON O. M., AWAD R. (2024) : No evidence of an association between size and levels of four per- and polyfluorinated substances (PFAS) in perch (*Perca fluviatilis*). *Science of The Total Environment*, Vol. 934, 173124.

ANNEXES

ANNEXE 1 : SYNTHÈSE DES CAMPAGNES D'ANALYSES DE PFAS DANS LES POISSONS DU LEMAN

	2008	2012	2018	2020	2024
Espèces	19 échantillons	42 échantillons	14 échantillons	74 échantillons	52 échantillons
	Corégone	Brochet	Gardon	Gardon	Brochet
	Lotte	Corégone	Lotte	Lotte	Corégone
	Omble chevalier	Lotte		Perche	Gardon
	Perche	Omble chevalier			Lotte
		Perche			Omble Chevalier
		Truite			Perche
					Truite
Matrices	Une partie des échantillons regroupe plusieurs individus	Une partie des échantillons regroupe plusieurs individus			
	Filet sans peau	Filet sans peau	Filet sans peau Carcasse Viscères - foie	Poisson entier	Filet sans peau Carcasse Foie
Substances recherchées	17 composés	1 composé	14 composés	17 composés	21 composés
	PFBS		PFBS	PFBS	PFBS
	PFHxS		PFHxS	PFHxS	PFHxS
	PFHpS		PFHpS	PFHpS	PFHpS
	PFOS	PFOS	PFOS	PFOS (Lin. + Ram.)	PFOS (Lin. + Ram.)
	PFDS		PFDS	PFDS	PFDS
	PFBA		PFBA	PFBA	PFBA
	PFPA		PFPA	PFPA	PFPA
	PFHxA		PFHxA	PFHxA	PFHxA
	PFHpA		PFHpA	PFHpA	PFHpA
	PFOA		PFOA	PFOA	PFOA
	PFNA		PFNA	PFNA	PFNA
	PFDA		PFDA	PFDA	PFDA
	PFUnDA		PFUnDA	PFUnDA	PFUnDA
	PFDoA		PFDoA	PFDoA	PFDoA
	PFTTrDA			PFTTrDA	PFTTrDA
	PFTeDA			PFTeDA	PFTeDA
	PFOSA				GenX
					DONA
					F53B Major
					F53B Minor

ANNEXE 2

STRATÉGIES DE PRÉLÈVEMENT

Quatre stratégies d'étude ont systématiquement été mises en œuvre :

1. Prospection des strates benthiques, y compris profondes, au moyen d'engins de type filet maillant multimailles, adaptés du protocole EN14757 (Afnor, 2015). La dimension standard de ces engins est $L = 30 \times H = 1.5$ m, soit S.U. = 45 m².
2. Prospection des strates sublittorales et pélagiques, au moyen de filets verticaux (adaptés de Degiorgi et Grandmottet, 1993). La surface de ces engins n'est pas standardisée, sauf en largeur ($L = 2$ m) car elle est directement proportionnelle à la profondeur où ils sont mis en œuvre.
3. Prospection des différents habitats littoraux cartographiés, par pêche électrique de sondage.
4. Prospection de la zone pélagique par hydroacoustique. Cette méthode ne permet pas la capture de poissons mais un comptage d'individus et l'évaluation de la biomasse en place.

Les deux premières techniques utilisent des engins dits passifs. Pour chaque effort unitaire de prospection, le set de maille est standardisé et s'étend de 5 à 55 mm. Les engins sont en général déployés en fin d'après-midi (2 à 3h avant le coucher du soleil) et relevés en début de matinée (2 à 3 h après le lever du soleil). Ils prospectent le plan d'eau dans une zone de profondeur s'étendant de 1.5 à 300 m. Les poissons destinés à l'évaluation de la contamination par les PFAS sont presque exclusivement issus de ces deux premières techniques.

Les deux dernières techniques d'échantillonnage sont dites actives. Pour la pêche électrique, elle est opérante sur une gamme de profondeur de 0 à 1.5 m alors que pour l'hydroacoustique, elle n'est efficace qu'à partir de 2 - 3 m de profondeur.

Les rendements de pêche se sont avérés très bas et les conditions de pêche particulièrement difficiles à cause du vent. Dès la deuxième semaine il a donc été envisagé de faire appel à des pêcheurs professionnels pour compléter l'échantillonnage car il paraissait probable que les pêches de l'inventaire piscicole ne suffiraient pas pour réaliser le plan de prélèvement retenu. Malheureusement les pêcheurs professionnels ont également été confrontés aux mêmes conditions et n'ont pu que partiellement compléter l'échantillonnage de l'inventaire piscicole. Finalement, seuls 4 corégones ont été achetés auprès d'un pêcheur professionnel français.

PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les poissons ont été préparés par le LABERCA, les filets ont été levés avec des couteaux à lame céramique puis après le prélèvement des filets, les carcasses ont été broyées en totalité pour obtenir un échantillon homogène. Les broyeurs sont en aluminium, ils sont lavés et rincés à l'éthanol entre chaque échantillon. Les foies ont été prélevés en amont par le service pisciculture de l'école ONIRIS.

Les échantillons frais ont été congelés à -20°C puis lyophilisés pendant 48 heures minimum dans des coupelles en verre. Les lyophilisats sont ensuite broyés et conservés avant analyse à -20°C dans des pots en polypropylène.

EXTRACTION, PURIFICATION ET ANALYSE

Le protocole analytique mis en œuvre par le laboratoire LABERCA repose sur une double purification sur colonnes SPE adaptées aux propriétés physico-chimiques des composés.

Une extraction liquide solide est réalisée sur l'échantillon sec avec un mélange KOH/méthanol (0.01 M). Puis, après une nuit à température ambiante, le surnageant est évaporé et transféré sur une colonne Chromabond PFAS SPE (300 mg, 6 mL ; Macherey-Nagel) puis élué avec une solution de méthanol/NH₄OH (99.5/0.5, v/v). Après évaporation jusqu'à un volume d'environ 1 mL, le solvant est déposé sur une colonne ENVI Carb SPE (500 mg, 6 mL ; Supelco) puis élué avec un mélange méthanol/acide acétique glacial (80/1, v/v).

L'extrait final est injecté sur un système LC-MS/MS (Agilent Technology, 6495C) en mode électrospray négatif sur une colonne Hypersil Gold (100 x 2.1 mm x 1.9 µm). La méthode de quantification est basée sur la dilution isotopique et utilise des étalons internes marqués au ¹³C.

ANNEXE 3 : LISTE DES POISSONS RÉCOLTÉS

Secteur	Prélèvement	Espèce	Taille (mm)	Poids (g)
-	Chimistes cantonaux	Brème	540	1600
Petit Lac	Chimistes cantonaux	Brochet	300	190
Au large de Morges	Chimistes cantonaux	Brochet	400	500
Morges	Inventaire piscicole	Brochet	520	1607
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Brochet	530	962
Morges	Inventaire piscicole	Brochet	565	1385
Morges	Inventaire piscicole	Brochet	590	1506
Devant le port de Morges	Chimistes cantonaux	Brochet	600	1400
Tour carré	Chimistes cantonaux	Brochet	630	1852
Au large de Morges	Chimistes cantonaux	Brochet	800	3700
-	Chimistes cantonaux	Brochet	830	0
-	Chimistes cantonaux	Brochet	840	4000
Versoix	Chimistes cantonaux	Brochet	1050	10000
Au large de Morges	Chimistes cantonaux	Corégone	240	84
Devant le port de Morges	Chimistes cantonaux	Corégone	260	114
Devant la piscine de Nyon	Chimistes cantonaux	Corégone	265	125
Morges	Inventaire piscicole	Corégone	270	180
Petit Lac	Chimistes cantonaux	Corégone	270	165
BRET-Saint Gingolph France	Chimistes cantonaux	Corégone	-	250
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Corégone	341	290
Au large de Saint-Sulpice	Chimistes cantonaux	Corégone	410	530
Evian	Inventaire piscicole	Corégone	411	741
Devant le port de Tannay	Chimistes cantonaux	Corégone	420	600
Devant le port de Nyon	Chimistes cantonaux	Corégone	430	700
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Corégone	437	666
Evian	Inventaire piscicole	Corégone	450	963
Evian	Inventaire piscicole	Corégone	452	899
Evian	Inventaire piscicole	Corégone	470	944
Thonon	Inventaire piscicole	Gardon	162	50
-	Chimistes cantonaux	Gardon	165	40
Zone de Rolle	Chimistes cantonaux	Gardon	175	52
Zone de Gland	Chimistes cantonaux	Gardon	180	64
Zone de Vidy	Chimistes cantonaux	Gardon	180	62
-	Chimistes cantonaux	Gardon	190	65
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Gardon	216	105
Founex	Inventaire piscicole	Gardon	235	134
Morges	Inventaire piscicole	Gardon	235	134
Morges	Inventaire piscicole	Gardon	235	138
Au large de Morges	Chimistes cantonaux	Gardon	240	146
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Gardon	255	194
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Gardon	272	206
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Gardon	275	224
Founex	Inventaire piscicole	Gardon	285	248
Morges	Inventaire piscicole	Gardon	290	228
Thonon	Inventaire piscicole	Gardon	302	369
Thonon	Inventaire piscicole	Lotte	179	45
Thonon	Inventaire piscicole	Lotte	192	62
Morges	Inventaire piscicole	Lotte	221	60

Secteur	Prélèvement	Espèce	Taille (mm)	Poids (g)
Thonon	Inventaire piscicole	Lotte	225	84
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Lotte	252	127
Lausanne	Inventaire piscicole	Lotte	260	116
Lausanne	Inventaire piscicole	Lotte	264	120
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Lotte	365	354
Au large de Morges	Chimistes cantonaux	Omble chevalier	250	200
Morges	Inventaire piscicole	Omble chevalier	370	486
Devant le port de Nyon	Chimistes cantonaux	Omble chevalier	380	450
Zone de Rolle	Chimistes cantonaux	Perche	130	20
Hermance	Chimistes cantonaux	Perche	150	40
Devant le port de Morges	Chimistes cantonaux	Perche	160	46
La nasse	Chimistes cantonaux	Perche	160	40
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	163	50
Devant le port de Nyon	Chimistes cantonaux	Perche	165	65
Au large de Morges	Chimistes cantonaux	Perche	170	54
Quai de Cologny	Chimistes cantonaux	Perche	170	60
Zone de Rolle	Chimistes cantonaux	Perche	170	52
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	171	88
-	Chimistes cantonaux	Perche	175	50
Devant le port de Tannay	Chimistes cantonaux	Perche	175	60
La nasse	Chimistes cantonaux	Perche	175	60
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	175	64
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	175	65
Tour carré	Chimistes cantonaux	Perche	175	50
Versoix	Chimistes cantonaux	Perche	175	50
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	177	62
Au large de Vidy	Chimistes cantonaux	Perche	180	70
Devant le port de Morges	Chimistes cantonaux	Perche	180	63
Devant la piscine de Nyon	Chimistes cantonaux	Perche	180	60
Devant la plage de Promenthoux	Chimistes cantonaux	Perche	180	60
Zone de Gland	Chimistes cantonaux	Perche	180	50
Reposoir	Chimistes cantonaux	Perche	180	64
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	180	68
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	180	69
Tour carré	Chimistes cantonaux	Perche	180	70
Devant le port de Morges	Chimistes cantonaux	Perche	185	74
Zone de Vidy	Chimistes cantonaux	Perche	185	68
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	185	85
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	188	75
Quai de Cologny	Chimistes cantonaux	Perche	190	75
Thonon	Inventaire piscicole	Perche	192	85
Devant le port de Morges	Chimistes cantonaux	Perche	200	76
Hermance	Chimistes cantonaux	Perche	200	110
Versoix	Chimistes cantonaux	Perche	200	95
Founex	Inventaire piscicole	Perche	205	102
-	Chimistes cantonaux	Perche	210	128
Zone de Gland	Chimistes cantonaux	Perche	210	86
Bellevue	Chimistes cantonaux	Perche	220	60
Hermance	Chimistes cantonaux	Perche	230	130

Secteur	Prélèvement	Espèce	Taille (mm)	Poids (g)
Morges	Inventaire piscicole	Perche	230	173
Versoix	Chimistes cantonaux	Perche	230	100
Devant la piscine de Nyon	Chimistes cantonaux	Perche	235	150
Zone de Vidy	Chimistes cantonaux	Perche	235	156
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Perche	235	139
Devant la plage de Promenthoux	Chimistes cantonaux	Perche	240	150
Morges	Inventaire piscicole	Perche	249	179
Hermance	Chimistes cantonaux	Perche	260	200
Zone de Gland	Chimistes cantonaux	Perche	260	238
-	Chimistes cantonaux	Perche	268	220
Petit Lac	Chimistes cantonaux	Perche	270	165
Morges	Inventaire piscicole	Perche	275	268
Hermance	Chimistes cantonaux	Perche	280	320
Morges	Inventaire piscicole	Perche	294	347
Founex	Inventaire piscicole	Perche	325	386
Saint-Gingolph	Inventaire piscicole	Perche	325	374
Devant le port de Nyon	Chimistes cantonaux	Silure	670	2170
BRET-Saint Gingolph France	Chimistes cantonaux	Truite	40	624
Founex	Inventaire piscicole	Truite	222	111
Morges	Inventaire piscicole	Truite	602	2495
Devant le port de Nyon	Chimistes cantonaux	Truite	750	4500