

ANALYSE ET CARACTÉRISATION DE MICROPLASTIQUES DANS DES TUBES DIGESTIFS DE POISSONS DU LÉMAN PAR IMAGERIE LASER INFRAROUGE

ANALYSIS AND CHARACTERIZATION OF MICROPLASTICS IN DIGESTIVE TRACTS OF FISHES FROM LAKE GENEVA USING LASER INFRARED IMAGING

CAMPAGNE 2021

PAR

Florian BREIDER

ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, ENAC-III-GR-CEL STATION 2 CH-1015 LAUSANNE

RÉSUMÉ

*La pollution par les microplastiques est une source de préoccupation croissante du fait de leurs impacts potentiels sur les écosystèmes terrestres et aquatiques. Depuis quelques années, il est établi que les microplastiques sont présents dans l'ensemble des écosystèmes aquatiques, rivières, lacs, mers, océans, dont le Léman et ses affluents. Dans le cadre d'une première étude financée par la CIPEL en 2020, il a été démontré que les poissons du Léman peuvent ingérer des microplastiques. Cette étude menée sur quatre espèces (la lote [*Lotta lotta*], le gardon [*Rutilus rutilus*], la perche [*Perca fluviatilis*], et la féra [*Coregonus lavaretus*]) a permis de montrer que 10 % des individus étudiés contenaient des microplastiques d'une taille $>500 \mu\text{m}$ dans leur tube digestif. Dans le but de quantifier et caractériser les particules $<500 \mu\text{m}$, les échantillons ont été ré-analysés par imagerie laser directe infrarouge et comparés avec une bibliothèque spectrale incluant plusieurs centaines de spectres de polymères et de matériaux d'origine biologique. Cette technique innovante a permis de mettre en évidence qu'un nombre important de microplastiques $<500 \mu\text{m}$ sont également ingérés par les poissons du Léman. Les principaux polymères identifiés sont le polyamide, le polycarbonate, le polyéthylène téréphtalate, le polyuréthane et le chlorure de polyvinyle. Le type et le nombre de microplastiques détectés sont relativement similaires pour les quatre espèces étudiées. Les concentrations de microplastiques de taille entre 12 et $500 \mu\text{m}$ sont comprises entre 100 et 200 particules par individu en moyenne. Ces résultats suggèrent que toutes les espèces étudiées sont exposées aux microplastiques et indiquent que le degré de contamination des poissons du Léman est comparable à d'autres études réalisées sur des espèces marines et d'eau douce.*

ABSTRACT

*Microplastic pollution is a growing concern due to its potential impacts on terrestrial and aquatic ecosystems. In the last several years, findings show that microplastics are present in all aquatic ecosystems, rivers, lakes, seas, oceans, including Lake Geneva and its tributaries. As part of a first study funded by CIPEL in 2020, it was demonstrated that fish in Lake Geneva can ingest microplastics. This study conducted on four species (*Lotta lotta*, *Rutilus rutilus*, *Perca fluviatilis*, *Coregonus lavaretus*) showed that 10% of the studied individuals contained microplastics $>500 \mu\text{m}$ in their digestive system. In order to quantify and characterize particles $<500 \mu\text{m}$, these samples were re-analyzed by direct infrared laser imaging and compared with a spectral library including the spectra of few hundred polymers and biological materials. This innovative technique made it possible to demonstrate that a large number of microplastics $<500 \mu\text{m}$ is also ingested by fish in Lake Geneva. The main polymers identified are polyamide, polycarbonate, polyethylene terephthalate, polyurethane and polyvinyl chloride. The identified type and number of microplastics were relatively similar in the four studied species. The number of microplastics between 12 and $500 \mu\text{m}$ in size, range in average from 100 to 200 particles per individual. These results suggest all the studied species are exposed to microplastics and that the degree of contamination of fishes in Lake Geneva is comparable to other studies carried out on marine and freshwater species.*

1. INTRODUCTION

La pollution par les microplastiques est une préoccupation mondiale croissante qui affecte tous les écosystèmes terrestres et aquatiques, dont les systèmes d'eau douce comme le Léman et ses affluents. En 2019 et 2020, dans le cadre d'une démarche d'évaluation de la pollution par les microplastiques, une première étude a été réalisée pour évaluer leur présence dans les poissons du Léman. Cette étude impliquant quatre espèces de poissons avec différents types d'alimentation (*Lotta lotta*, *Rutilus rutilus*, *Perca fluviatilis*, *Coregonus lavaretus*) a permis de montrer que 10% des individus étudiés contenaient des microplastiques d'une taille >500 µm dans leur tube digestif (Siegenthaler and Breider, 2020). Ce résultat est du même ordre de grandeur que ceux rapportés par d'autres études scientifiques réalisées sur des poissons d'eau douce (Parker et al., 2021).

Bien qu'une faible fraction des poissons du Léman capturés pour cette étude contenait des microplastiques dans leur tube digestif, il est pour le moment impossible d'évaluer clairement l'impact de la présence de ces microplastiques dans le système digestif des poissons sur la santé des populations de perches, gardons, féras et lottes du Léman. Bien que des microplastiques >500 µm aient été détectés dans un nombre limité de poissons, il est probable que les poissons du Léman ingèrent également des microplastiques de plus petite taille.

La nature des polymères composant les microplastiques présents dans les systèmes digestifs des poissons est également une information importante pour identifier les sources potentielles de pollution mais également pour évaluer le risque posé par ces microparticules anthropogéniques. Malheureusement dans le cadre de la première étude menée en 2019-2020, la composition des microplastiques détectés n'avait pu être déterminée.

Ainsi le but de cette seconde étude est de comparer l'occurrence et la composition des microplastiques de taille comprise entre 12 et 500 µm dans les tubes digestifs de poissons du Léman. Pour cela, 89 appareils digestifs de perches (*Perca fluviatilis*), gardons (*Rutilus rutilus*), féras (*Coregonus lavaretus*) et lottes (*Lota lota*) prélevés en 2019 dans le Léman par des pêcheurs professionnels ont été ré-analysés par imagerie laser infrarouge (LDIR). Cette technique utilise un laser à cascade quantique infrarouge permettant à la fois de prendre des images des échantillons dans le domaine infrarouge mais également de mesurer de manière automatique le spectre des particules détectées entre 900 cm⁻¹ et 1800 cm⁻¹ et de les comparer avec une bibliothèque spectrale permettant ainsi de caractériser les matériaux constituant les particules.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. PRODUITS CHIMIQUES

Les produits suivants ont été commandés chez Sigma-Aldrich : hydroxyde de potassium (KOH, réf. 484016), chlorure de zinc (ZnCl₂, réf. 211273). Les filtres utilisés pour cette étude proviennent de Sigma-Aldrich (GF/D 2.7 µm, Ø47 mm, Whatman® réf. WHA1823047 et PCTE, 12 µm, Ø25mm Whatman® réf. WHA70602516). Des lames de verre spécialement traitées pour refléter la lumière infrarouge ont été utilisées pour les analyses LDIR (Kevly MirrIR low-E slide).

2.2. ECHANTILLONNAGE

Les systèmes digestifs des poissons analysés dans cette étude ont été fournis par la CIPEL. Les espèces étudiées sont les suivantes : *Perca fluviatilis* (n=25), *Rutilus rutilus* (n=27), *Coregonus lavaretus* (n=27) et *Lota lota* (n=10). Ces poissons ont été capturés par des pêcheurs professionnels et proviennent de trois grandes zones de prélèvement (Haut Lac : HL, Grand Lac 1 : GL1, Grand Lac 2 : GL2, Petit Lac : PL) et de cinq localités (Allaman GL2, Tolochenaz GL1, Clarens HL, Villeneuve HL et Hermance PL). Tous les échantillons ont été congelés le jour même et conservés à -20°C jusqu'à l'analyse.

2.3. ISOLATION ET ANALYSES DES MICROPLASTIQUES

Le protocole utilisé pour l'isolation et la quantification des microplastiques présents dans le système digestif des poissons est basé sur le protocoles de Froidevaux, 2019, d'Erni-Cassola et al., 2017 et de Maes et al., 2017. Les différentes étapes de ce protocole sont les suivantes :

- L'abdomen des poissons a été incisé et les tubes digestifs placés au congélateur à -20°C jusqu'à l'analyse.
- Les tubes digestifs ont été placés dans des béciers de 250 ml et la matière organique a été dégradée dans 50 mL ou 100 mL de KOH 10% à 60°C pendant 24 h (en fonction de la quantité de tissus à digérer).

- 50 ml d'eau ultra-pure ont ensuite été ajoutés pour obtenir une solution plus claire et ainsi faciliter le tamisage et la filtration.
- Les extraits ont été tamisés à 500 µm et filtrés à 0.7 µm et récupérés dans des béchers de 250 mL.
- Les particules présentes sur les filtres ont ensuite été séparées par densité. Les filtres ont été introduits dans des tubes à centrifuger avec 8 mL de solution de ZnCl₂ 37.5% et centrifugés 10 minutes à 3000 rpm. Le surnageant a été prélevé avec une pipette en verre (~1 cm) puis filtré avec des membranes PCTE 12 µm avec un Büchner.
- Le Büchner et le filtre ont été rincés une première fois avec 25 mL d'eau ultra-pure puis une seconde fois avec 25 mL d'éthanol 70%.
- Le filtre a été inséré dans un flacon de 10 mL en verre contenant 2 mL d'éthanol 70%
- Le flacon a ensuite été agité au vortex pour re-suspendre les microplastiques dans l'éthanol.
- Les lames de verre (Kevley MirrIR low-E slide) ont été nettoyées avec de l'éthanol 70%.
- L'échantillon a été agité une seconde fois au vortex.
- 2×30 µL de la suspension ont ensuite été prélevés et déposés sur la lame.
- La lame de verre a été séchée à plat pour évaporer l'éthanol.
- La lame de verre a ensuite été introduite dans le LDIR (Agilent 8700) pour analyse.

2.4. DÉTECTION ET CARACTÉRISATION DES MICROPLASTIQUES

Les microplastiques ont été détectés et caractérisés par imagerie laser infrarouge à l'aide d'un LDIR équipé d'un laser à cascade quantique (Agilent 8700) travaillant dans une gamme de nombre d'onde comprise entre 1800 et 900 cm⁻¹. Les spectres infrarouges des particules détectées ont été comparés avec une bibliothèque comprenant plus de 300 spectres de polymères et de matériaux d'origine biologique. Quatre plages d'indices de qualité des résultats ont été définies. La qualité des résultats décrit à quel point le spectre de l'échantillon correspond à celui de la bibliothèque de référence. Pour cette étude, les plages de classification des correspondances entre les spectres mesurés et ceux inclus dans la bibliothèque spectrale ont été fixées ainsi : degré de confiance moyen 0,65 à 0,75 ; degré de confiance élevé 0,75 à 0,85 et degré de confiance très élevé 0,85 à 0,99. Toutes les particules tombant en dehors de cette plage, c'est-à-dire < 0,65, ont été classées comme "indéfinies". La résolution spatiale utilisée pour ces analyses était de 10 µm. Des contrôles négatifs et des blancs de laboratoire ont été préparés et analysés en suivant le protocole ci-dessus. Aucun de ces contrôles ne s'est révélé positif après analyse par LDIR. Ceci indique que les particules de plastique détectées dans les échantillons ne proviennent pas du processus d'extraction ou d'une contamination des échantillons.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Sur les 89 tubes digestifs analysés par LDIR, toutes espèces confondues, l'ensemble des échantillons contenaient des microplastiques. Le nombre de microplastiques mesuré varie entre 33 et 267 particules par tube digestif avec un nombre médian et moyen de 200 et 171 particules par tube digestif. 16 % des particules détectées avait un indice de qualité <0.65, 49% ont été identifiées avec un indice de confiance moyen et 35 % avec un indice de confiance élevé ou très élevé. Les particules avec un indice <0.65 ont été considérées automatiquement comme non identifiées.

Les concentrations moyennes et écarts-types mesurés dans les différentes espèces de poissons sont de 169 ±72 particules pour *Coregonus labaretus*, 168 ±60 particules pour *Rutilus rutilus*, 181 ±33 particules pour *Lota lota* et 173 ±61 particules pour *Perca fluviatilis* (Figure 1). Ces chiffres correspondent aux particules détectées avec un indice de qualité >0.65.

Au total treize polymères ont été identifiés : polyamide (PA), polycarbonate (PC), polyéthylène téréphtalate (PET), polyuréthane (PU), chlorure de polyvinyle (PVC), caoutchouc, polyéthylène (PE), polybutadiène, polyméthylméthacrylate (PMMA), polystyrène (PS), polyacétale, alcool polyvinylique, éthylène-acétate de vinyl (EVA), vernis alkyl phénolique. Parmi ces polymères, le PA, PET, PU, PVC, PC et le caoutchouc constituent plus de 80 % des microplastiques détectés (Figure 2). Les polyamides (PA) synthétiques sont couramment utilisés dans les textiles, l'industrie automobile, les tapis, les ustensiles de cuisine et les vêtements de sport en raison de leur grande durabilité et de leur résistance.

Le PET, le PU, le PVC et le PC sont également utilisés pour un grand nombre d'applications soit sous forme de fil (p.ex. rembourrage de peluches, coussins, couettes, vêtements), de film (revêtement intérieur de canettes et conserves, aluminium ou acier) ou solide (bouteilles, tuyaux, CD, vitrage). Il est important de noter que l'analyse LDIR ne permet pas la détection des particules d'abrasion de pneus en raison de la teneur élevée de suie dans ces particules. Il est donc possible que d'autres particules anthropogéniques organiques absorbant fortement l'infrarouge, telles que les particules d'usure de pneus, soient également ingérées par les poissons.

La figure 3 montre la distribution de taille des particules constituées de ces six matériaux. Entre 40 à 80 % de ces particules ont une taille comprise entre 12 et 100 μm (Figure 3). Les distributions de taille des microplastiques détectés dans les tubes digestifs des poissons sont typiques de microplastiques secondaires formés par fragmentation de particules de plus grande taille. En supposant que la plupart des particules de petite taille sont formées par fragmentation de plus grosses particules et que la masse de celles-ci est conservée, le nombre de particules évoluera inversement avec le rayon des particules à la puissance de 3. Les concentrations environnementales documentées dans les études semblent suivre ce modèle mais avec un exposant légèrement inférieur (2,67) (Lenz et al., 2016). Ceci suggère que les poissons sont potentiellement également exposés à des particules plus petites dont la taille est inférieure à la résolution du LDIR ($\sim 10 \mu\text{m}$) et qui ne sont par conséquent pas détectables dans le cadre de cette étude.

Les quatre espèces de poissons étudiées présentent des concentrations de microplastiques du même ordre de grandeur et de composition très similaire. Ces résultats suggèrent que les poissons du Léman sont exposés à une grande diversité de particules de polymères essentiellement de taille inférieure à 100 μm . Le type de régime alimentaire et d'habitat des poissons du Léman ne semblent pas influencer l'exposition des poissons aux microplastiques. Cependant, l'analyse d'un nombre plus important de poissons serait nécessaire pour confirmer ce résultat.

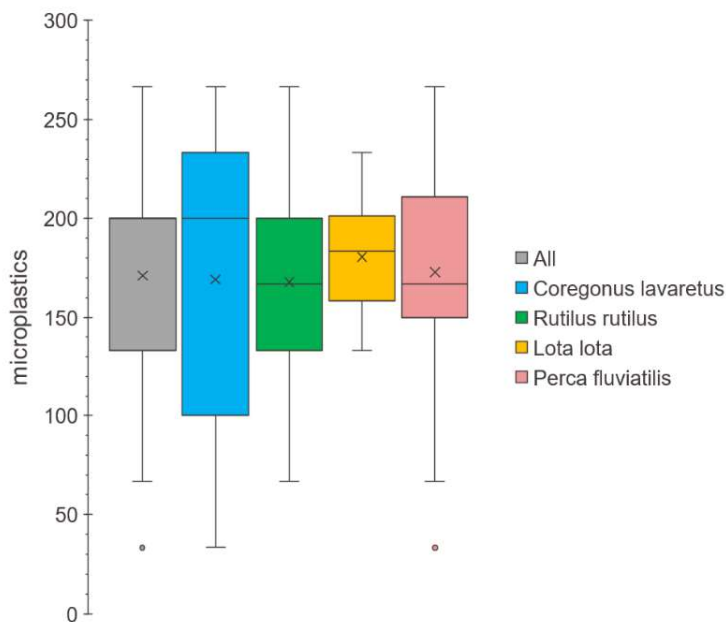


Figure 1 : Nombre de microplastiques mesuré par individu dans les différentes espèces de poissons. *Perca fluviatilis* ($n=25$), *Rutilus rutilus* ($n=27$), *Coregonus lavaretus* ($n=27$) et *Lota lota* ($n=10$). Les croix correspondent au nombre moyen alors que les barres horizontales correspondent au nombre médian de microplastiques par individu. La partie inférieure de la boîte rectangulaire représente le deuxième quartile alors que la partie supérieure de la boîte rectangulaire représente le troisième quartile. Les lignes verticales indiquent la variabilité hors des quartiles inférieures et supérieures, et tout point situé en dehors de ces lignes est considéré comme hors norme. La valeur médiane est exclue du calcul du quartile si N est impair.

Figure 1: Number of microplastics measured per individual in the different fish species. *Perca fluviatilis* ($n=25$), *Rutilus rutilus* ($n=27$), *Coregonus lavaretus* ($n=27$), and *Lota lota* ($n=10$). Xs correspond to the mean number, while the horizontal bars indicate the median number of microplastics per individual. The lower part of the rectangular box represents the second quartile, while the upper part of the rectangular box represents the third quartile. The vertical lines indicate variability outside of the lower and upper quartiles, and any point located outside these lines is considered outside the standard. The median value is excluded from the quartile calculation if N is an odd number.

Les concentrations de microplastiques mesurées dans cette étude sont supérieures d'un à deux ordres de grandeur à la plupart de celles reportées dans la littérature scientifique. Ceci s'explique par le fait que la plupart des études publiées à ce jour considèrent uniquement les particules de taille supérieure à ~200-300 μm (Parker et al., 2021) et que la concentration de microplastiques secondaires suit une loi de puissance qui évolue inversement avec le rayon celles-ci (Lenz et al., 2016). Les polymères identifiés dans le cadre de cette étude ont pour la plupart également été détectés dans le contenu gastro-intestinal d'autres espèces de poissons d'eau douce à travers le monde mais également dans l'eau du Léman (Faure et al., 2016, 2015, 2012; Parker et al., 2021).

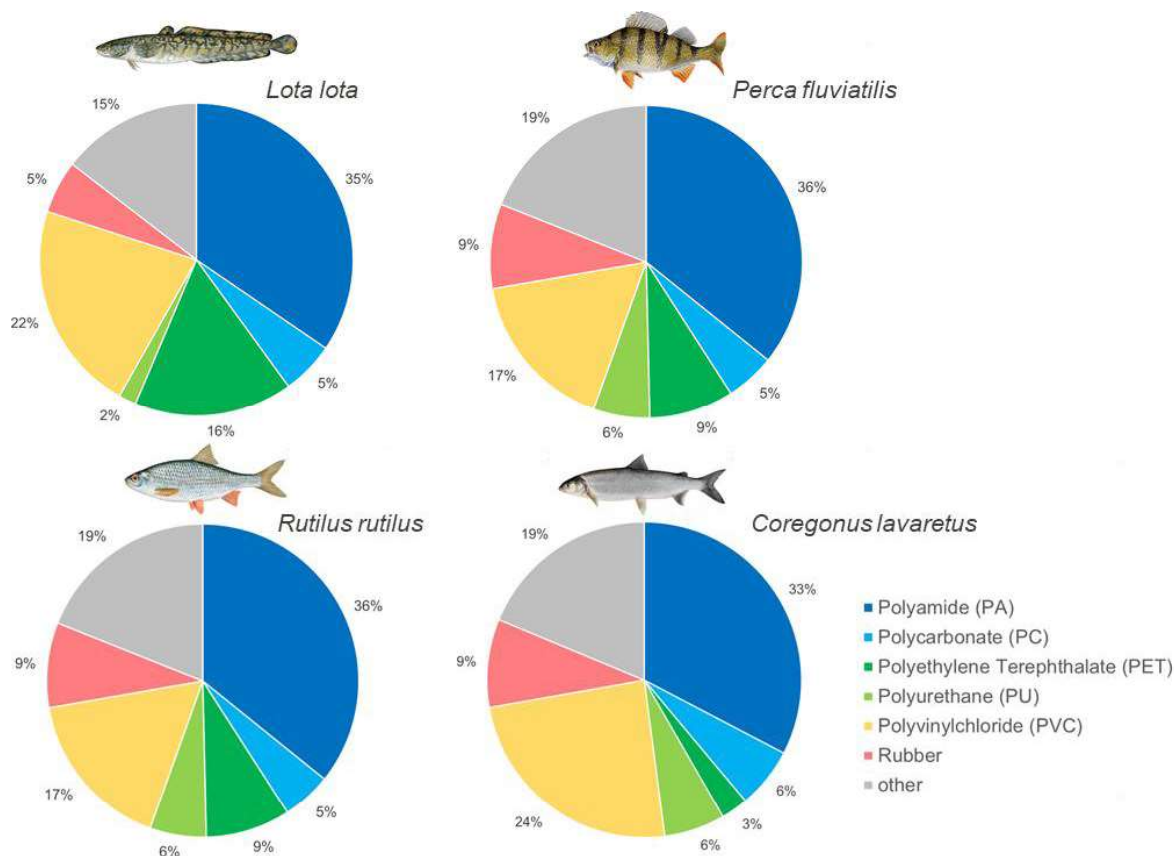


Figure 2 : Distribution des polymères identifiés dans chaque espèce de poisson.

Figure 2: Distribution of the polymers identified in each fish species

Les particules détectées dans les tubes digestifs des poissons ont probablement été co-ingérées via l'alimentation, les sédiments ou directement par l'ingestion d'eau. Après ingestion, les microplastiques peuvent affecter les poissons de trois manières : (I) par les effets physiques des microplastiques eux-mêmes (p.ex. en bloquant le tube digestif ou en provoquant une fausse satiété); (II) par la migration de plastifiants, d'additifs et d'autres produits chimiques nocifs à l'intérieur des microplastiques ; et (III) par la désorption de micropolluants adsorbés à la surface des microplastiques (Parker et al., 2021; Strungaru et al., 2019). Dans le cadre de cette étude les additifs et les micropolluants associés aux microplastiques n'ont pas été analysés. Il n'est donc pas possible d'évaluer la toxicité potentielle des microplastiques ingérés du point de vue chimique.

Cependant, l'analyse LDIR a permis d'évaluer la taille des particules détectées. La taille des microplastiques est une caractéristique importante affectant le devenir des microplastiques dans le système digestif des poissons, en particulier les petites particules, généralement <10 μm , peuvent traverser la barrière intestinale, atteindre le sang et éventuellement les autres organes (Parker et al., 2021; Ribeiro et al., 2019). La gamme de particules pouvant traverser la barrière intestinale varie cependant selon les espèces et seules les particules d'une forme, d'une taille et d'une chimie particulières peuvent passer (Ribeiro et al., 2019).

De plus, les microplastiques peuvent également être modifiés et dégradés tout au long du tube gastro-intestinal par des processus tels que la macération, la digestion, etc. qui peuvent potentiellement produire des particules plus fines capables de passer la barrière intestinale (Parker et al., 2021). Les particules détectées dans cette seconde étude sont toutes supérieures à 12 µm en raison de la résolution spatiale du LDIR, qui est limitée par le diamètre du faisceau laser et du type de filtre utilisé pour la préparation des échantillons. Ainsi, les microplastiques détectés n'ont probablement pas la possibilité de passer la barrière intestinale et d'être transférés dans le sang et d'autres organes.

Néanmoins, leur présence dans le tube gastro-intestinal pourrait avoir des effets physiques sur les tissus du système digestif et une toxicité chimique si ces particules transportent des additifs ou des micropolluants adsorbés nocifs pour les poissons. En faisant l'hypothèse que les particules détectées peuvent elles-mêmes être fragmentées dans le système digestif par abrasion mécanique avec d'autres particules (p.ex. nourriture, sédiment) ou par dégradation chimique, il est hautement probable que des particules de plus petite taille soient également présentes dans l'estomac ou l'intestin voire dans d'autres organes des poissons étudiés.

Afin d'avoir une évaluation plus précise de l'exposition des poissons du lac aux microplastiques, d'autres méthodes de détection sont nécessaires. Par exemple, l'analyse des tubes digestifs des poissons par pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse pourrait donner des informations complémentaires comme la concentration massique de chaque polymère ainsi que la concentration en particules d'usure de pneus (Peters et al., 2018; Ribeiro et al., 2020). Cette méthode a l'avantage que la limite de détection n'est pas définie par la taille des particules mais par la masse de polymère présente dans l'échantillon. Cette approche permet également de détecter certains additifs ou composés chimiques présents dans les particules de plastique. Cependant, cette technique ne permet pas de quantifier le nombre de particules et ainsi tirer des conclusions quant à l'effet physique de celles-ci et de leur éventuel transfert vers d'autres organes.

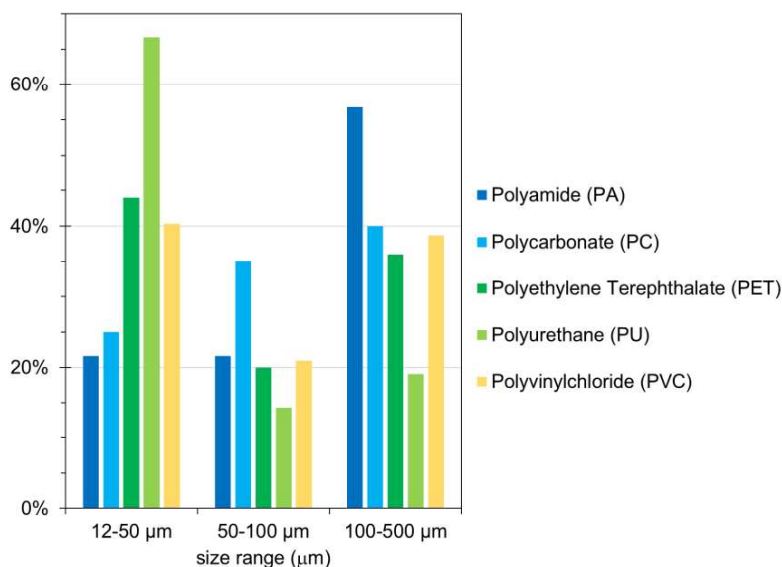


Figure 3 : Distribution de la taille des microplastiques par type de polymère.

Figure 3: Distribution of microplastic size by type of polymer

4. CONCLUSIONS

Malgré l'importance du poisson comme nourriture pour l'homme et son rôle central dans les écosystèmes aquatiques, le nombre d'études portant spécifiquement sur la charge plastique chez les espèces d'eau douce est limité, et parmi celles-ci, la plupart se limitent à un petit nombre d'échantillons et aux particules de taille supérieure à 200-300 µm. La présente étude a permis de montrer que l'ensemble des espèces et individus analysés étaient contaminés par des microplastiques dont la majorité ont un diamètre inférieur à 100 µm. Ceci démontre pour la première fois que les poissons du Léman ingèrent un grand nombre de microplastiques de petite taille et de composition variée. Cependant, il n'est pas possible à ce stade d'évaluer l'impact de l'ingestion de ces particules sur la santé des poissons et plus globalement sur l'écosystème formé par le Léman et les organismes qui y vivent. D'autres études seront donc nécessaires pour déterminer les conséquences à court et long à termes de la pollution plastique sur cet écosystème.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie la CIPEL et les membres de son Conseil Scientifique de l'avoir mandaté et financé pour cette étude ainsi que les collaborateurs du Laboratoire Central Environnemental de l'EPFL pour leur aide lors des travaux de laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- Erni-Cassola, G., Gibson, M.I., Thompson, R.C., Christie-Oleza, J.A., 2017. Lost, but Found with Nile Red: A Novel Method for Detecting and Quantifying Small Microplastics (1 mm to 20 μ m) in Environmental Samples. *Environ. Sci. Technol.* 51, 13641–13648. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04512>
- Faure, F., Alencastro, D., Felipe, L., 2016. Microplastiques: situation dans les eaux de surface en Suisse. *Aqua Amp Gas* 72–77.
- Faure, F., Corbaz, M., Baecher, H., Felipe, L., 2012. Pollution due to plastics and microplastics in Lake Geneva and in the Mediterranean Sea. *ARCHIVES DES SCIENCES* 7.
- Faure, F., Demars, C., Wieser, O., Kunz, M., Alencastro, L.F. de, 2015. Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environ. Chem.* 12, 582–591. <https://doi.org/10.1071/EN14218>
- Froidevaux, S., 2019. Microplastiques dans les poissons du Lac Léman ? Prospection sur le Gardon (*Rutilus rutilus*) et la Perche (*Perca fluviatilis*). Master (Master Thesis). Université de Lausanne.
- Lenz, R., Enders, K., Nielsen, T.G., 2016. Microplastic exposure studies should be environmentally realistic. *PNAS* 113, E4121–E4122. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606615113>
- Maes, T., Jessop, R., Wellner, N., Haupt, K., Mayes, A.G., 2017. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports* 7, 44501. <https://doi.org/10.1038/srep44501>
- Parker, B., Andreou, D., Green, I.D., Britton, J.R., 2021. Microplastics in freshwater fishes: Occurrence, impacts and future perspectives. *Fish and Fisheries* 22, 467–488. <https://doi.org/10.1111/faf.12528>
- Peters, C.A., Hendrickson, E., Minor, E.C., Schreiner, K., Halbur, J., Bratton, S.P., 2018. Pyr-GC/MS analysis of microplastics extracted from the stomach content of benthivore fish from the Texas Gulf Coast. *Marine Pollution Bulletin* 137, 91–95. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.049>
- Ribeiro, F., O'Brien, J.W., Galloway, T., Thomas, K.V., 2019. Accumulation and fate of nano- and micro-plastics and associated contaminants in organisms. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 111, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.010>
- Ribeiro, F., Okoffo, E.D., O'Brien, J.W., Fraissinet-Tachet, S., O'Brien, S., Gallen, M., Samanipour, S., Kaserzon, S., Mueller, J.F., Galloway, T., Thomas, K.V., 2020. Quantitative Analysis of Selected Plastics in High-Commercial-Value Australian Seafood by Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectrometry. *Environ. Sci. Technol.* 54, 9408–9417. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02337>
- Siegenthaler, B., Breider, F., 2020. Analysis of microplastics in river waters and digestive tracts of fishes from lake Geneva (Campagne 2019), *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut.*
- Strungaru, S.-A., Jijie, R., Nicoara, M., Plavan, G., Faggio, C., 2019. Micro- (nano) plastics in freshwater ecosystems: Abundance, toxicological impact and quantification methodology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 110, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.025>