

SUIVI DE LA FAUNE MACRO BENTHIQUE DU LITTORAL DU LÉMAN : ANALYSE DE LA CAMPAGNE 2024 ET DYNAMIQUE TEMPORELLE

MONITORING OF THE LITTORAL MACRO-BENTHIC FAUNA OF LAKE GENEVA: ANALYSIS OF THE 2024 CAMPAIGN AND TEMPORAL DYNAMICS

PAR

Jean-Nicolas BEISEL^{1,2}

HYDROÉCOLOGUE, ENSEIGNANT-CHERCHEUR À L'ENGEES/LIVE

¹ LABORATOIRE IMAGE VILLE ENVIRONNEMENT, FACULTE DE GEOGRAPHIE ET D'AMENAGEMENT, 3 RUE DE L'ARGONNE - 67000 STRASBOURG

² ENGEES - ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG, 1, COUR DES CIGARIERES - CS 61039 67070 STRASBOURG

RÉSUMÉ

*La campagne de suivi d'août 2024 des macroinvertébrés benthiques du Léman est la première à avoir été menée avec un protocole commun et un échantillonnage synchrone entre le canton de Genève, le canton de Vaud et Thonon Agglomération. Avec deux stations par région, les données issues de six sites permettent de dresser un bilan à large échelle et d'évaluer l'incidence des espèces exotiques (néozoaires), et en particulier celles des espèces exotiques envahissantes telles que la moule quagga -observée pour la première fois en 2015- sur la macrofaune benthique du Léman. Les communautés observées sont dominées en abondance par cinq taxons représentant plus de 90 % des individus : 71 % pour trois taxons exotiques (le crustacé *Dikerogammarus*, le gastéropode *Potamopyrgus antipodarum* et les Dreissènes), et 19 % pour les diptères chironomes et les oligochètes. Malgré une homogénéisation apparente liée à la surabondance d'espèces exotiques, d'importantes différences inter-sites persistent. Les Dreissènes, bien que présentes partout, ne sont dominantes en termes d'abondance qu'à Rivaz et Thonon-les-Bains. La richesse taxonomique varie de 14 à 25 taxons selon les stations (dont systématiquement 5 à 6 exotiques), avec une diversité plus élevée dans les stations genevoises. Elles présentent des compositions distinctes, avec davantage de taxons rares ou absents ailleurs. Les faibles profondeurs hébergent généralement moins de taxons, mais concentrent des insectes exigeants. Les groupes d'insectes hors diptères restent cependant très minoritaires. Une analyse complémentaire diachronique est possible sur le canton de Genève (>2017) et le canton de Vaud (>2013), malgré une grande variabilité inter-annuelle des abondances qui peuvent varier d'un facteur 5. Elle révèle que l'année 2024 fournit une image des communautés de macroinvertébrés benthiques très similaire à celle de la période qui a précédé (2021-2023). A Rivaz, un changement important s'opère en 2017 avec la perte de plusieurs taxons qui ne sont plus retrouvés ensuite sur ce site, dont des genres de Trichoptères. A Saint-Prex, un changement important est également observé mais sans perte nette de richesse. Une analyse NMDS confirme une structuration spatiale claire entre cantons, ainsi qu'une stabilité relative de la période 2021–2024. Quelques recommandations de suivi sont proposées sur la base du retour d'expérience de cette analyse.*

ABSTRACT

*The August 2024 benthic macroinvertebrate monitoring campaign of Lake Geneva was the first to apply a common protocol and synchronized sampling across the canton of Geneva, the canton of Vaud, and Thonon Agglomération. With two stations in each region, the data collected from six sites provide a large-scale overview and help assess the impact of exotic species -particularly invasive ones such as the quagga mussel (first observed in 2015) - on the lake's benthic macroinvertebrates. The observed communities are dominated in abundance by five taxa accounting for more than 90% of individuals: 71% for three exotic taxa (the crustacean *Dikerogammarus*, the gastropod *Potamopyrgus antipodarum*, and *Dreissena* spp.), and 19% for chironomid dipterans and oligochaetes. Despite an apparent homogenization linked to the overabundance of exotic species, significant differences persist between sites. *Dreissena* are ubiquitous but dominate community composition in terms of abundance only at Rivaz and Thonon-les-Bains. Taxonomic richness ranges from 14 to 25 taxa across stations (including consistently 5 to 6 exotic species), with higher diversity observed at the Geneva stations. These sites also exhibit distinct compositions, with a greater number of rare or locally absent taxa. Shallow depths generally host fewer taxa but concentrate more demanding insect species. At a broad scale, insect groups other than dipterans remain very scarce. A complementary diachronic analysis is possible for the Canton of Geneva (post-2017) and the Canton of Vaud (post-2013), despite substantial interannual variation in abundances—up to a fivefold difference. It shows that 2024 provides a macrobenthic community snapshot very similar to that of the preceding period (2021–2023). At Rivaz, a major shift occurred in 2017, marked by the loss of several taxa—such as trichopteran genera—that have not been observed again since. At Saint-Prex, a significant shift is also observed, though without a net loss in richness. An NMDS analysis confirms a clear spatial structuring between cantons, as well as a relative stability over the 2021–2024 period. A few monitoring recommendations are proposed based on insights gained from this analysis.*

1. INTRODUCTION

Les communautés de macroinvertébrés benthiques du littoral du Léman font régulièrement l’objet de suivis visant à évaluer leur diversité et l’importance des espèces exotiques. Ce compartiment biologique est généralement diversifié et sensible à la variété des habitats disponibles, à la qualité de l’eau et à l’état de naturalité des berges.

La campagne menée en août 2024 est la première à avoir été réalisée selon un protocole d’échantillonnage harmonisé, proposé par le canton de Vaud, et appliqué sur l’ensemble des sites. L’analyse des données obtenues sur deux stations dans chacun des trois secteurs géographiques (canton de Genève, canton de Vaud, Thonon Agglomération) représente une opportunité unique pour dresser un état des lieux de la macrofaune benthique à l’échelle du Léman. Ce rapport présente une sélection des analyses réalisées et met en avant les éléments clés de cette expertise. Les objectifs étaient d’évaluer (1) la diversité des macroinvertébrés benthiques à l’échelle du lac, (2) les principales différences entre sites, et (3) l’incidence potentielle des espèces exotiques (néozoaires), et tout particulièrement celles des espèces exotiques envahissantes telles que la moule quagga sur les communautés benthiques. Pour mettre en perspective ces résultats, une analyse des données 2024 par comparaison avec des données historiques a également été réalisée (approche diachronique). Des recommandations sont proposées à partir des éléments clés mis en évidence dans cette étude pour l’amélioration des futurs suivis de la faune benthique.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 SITES D’ÉTUDE ET PROTOCOLE D’ÉCHANTILLONNAGE

Six stations ont été échantillonnées en août 2024 : deux dans le canton de Genève (Versoix-Forel et Quai-de-Cologny), deux dans le canton de Vaud (Saint-Prex et Rivaz), deux dans la région de Thonon Agglomération (Messery et Thonon-les-Bains) (illustration de la localisation sur la Figure 3 de résultats).

Un plan d’échantillonnage harmonisé, proposé par le canton de Vaud, a été appliqué sur l’ensemble des sites étudiés lors de la campagne d’août 2024. Un guide méthodologique très complet décrit ce protocole (Menétrey *et al.*, 2025). En résumé, le protocole prévoit trois strates de différentes profondeurs : un minimum de deux prélèvements de type Surber entre 0 et 1 m, trois entre 1 et 3 m, et trois entre 3 et 5 m. Une option, appliquée dans le canton de Vaud, consistait à augmenter le nombre de prélèvements entre 0 et 1 m à 8 pour couvrir une grande diversité d’habitats et améliorer l’estimation des densités en incluant des réplicats par substrat. Des plongeurs réalisent les prélèvements et décrivent le contexte en termes d’habitats disponibles.

Si l’on considère les données historiques (tableau 1), uniquement disponibles pour la partie suisse, les protocoles sont assez homogènes au sein d’un canton mais différents entre les deux cantons suisses. Jusqu’en 2023, les prélèvements dans le canton de Vaud sont réalisés en plongée en novembre-décembre, à 5 profondeurs entre 0 et 10 m, avec 5 réplicats par profondeur d’échantillons réalisés avec un Surber modifié de 25 x 25 cm et un tri sur tamis avec un vide de maille de 0.63 mm. Sur le canton de Genève, les données historiques ont été acquises depuis 2017 en plongée en juillet-août, entre 0 et 5 m de profondeur en prenant 6 à 8 prélèvements qui correspondent à 2 ou 3 réplicats par tranche de profondeur, et un tri sur tamis de 0.5 mm. Dans le canton de Vaud, un plus grand nombre de prélèvements a été réalisé entre 0 et 1 m que dans le canton de Genève (8 contre 2 ou 3).

Tableau 1 : Données hydrobiologiques disponibles sur les trois secteurs d’étude.

Table 1 : Hydrobiological data available for the three study areas.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Canton de Genève					X				X		X	X
Canton de Vaud	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Thonon Agglomération												X

Des données sur les habitats présents lors des prélèvements sont fournies par les mandataires. On note des contrastes assez forts entre les différents contextes : rives artificielles sur les stations du canton de Genève et Vaud, plus naturelles sur celles de la partie française. Les assemblages d'espèces de macrophytes, lorsqu'elles sont présentes, varient autour du lac et peuvent par conséquent différencier fortement la nature des habitats des sites d'étude (Lods-Crozet *et al.*, 2013) et se répercuter sur la diversité et les abondances des macroinvertébrés (Papas, 2007, Cheng *et al.*, 2017).

Deux différences subsistent en 2024 entre les investigations du côté français et celles menées du côté suisse. La première concerne les surfaces unitaires d'échantillonnage, qui sont respectivement de 0.0625 m² en Suisse (cadre Surber modifié de 25 x 25 cm) et 0.05 m² en France (cadre Surber normalisé de 20 x 25 cm). Si l'on considère le minimum commun de 8 prélèvements réalisés par site, cette petite différence unitaire conduit à une différence globale de 0.12 m² qui sont échantillonnés en plus sur les stations en Suisse par rapport aux stations en France, soit l'équivalent de deux Surbers. Par ailleurs, le nombre de prélèvements entre 0 et 1 m de profondeur est de 8 sur les stations vaudoises, contre 2 ailleurs.

Tableau 2 : Substrats prélevés et description des berges des stations du Léman échantillonnées en 2024. Dans le canton de Genève, la visibilité extrêmement mauvaise au moment des prélèvements n'a pas permis la caractérisation des substrats prélevés.

Table 2 : Substrates sampled and description of the banks of the Lake Geneva stations sampled in 2024. In the canton of Geneva, extremely poor visibility at the time of sampling prevented the characterization of the collected substrates.

	Canton de Genève		Thonon Agglomération		Canton de Vaud	
	Versoix- Forel	Quai de Cologny	Messery	Thonon-les-Bains	St-Prex	Rivaz
Falaises_roches					1	1
Blocs mobiles					1	1
Gros_Galets			1	1	1	1
Galets			1	1	1	1
Graviers					1	
Sable		1	1	1	1	
Fines						1
Organiques_Grossiers						
Helophytes						
Hydrophytes						1
Algues		1				
Detail_Substrats			Substrat grossier peu colmaté	Substrat grossier peu colmaté		
Nature des rives	Artificielles	Artificielles	Naturelles	Naturelles	Artificielles	Artificielles
	Mur, enrochements et grève	Mur et enrochements	Grève, arboré	Grève, arboré	Mur et enrochements	Enrochements
Macrophytes	Potamot perfolié, characées	Potamot luisant, Myriophylle en épis	Potamot dense, Potamot perfolié		Potamot dense, Potamot perfolié	

La seconde différence concerne les niveaux de détermination taxonomique, qui s'arrêtent généralement au genre côté français (hors diptères Chironomidae et Oligochètes) mais qui sont poussés au niveau spécifique en Suisse pour les mollusques Sphaeriidae (au moins le genre *Pisidium*), les insectes Ephéméroptères et Trichoptères. L'incidence de cela est l'impossibilité de classer les taxons non déterminés à l'espèce selon un statut de conservation UICN, ce qui rend impossible une analyse à l'échelle du lac. Pour compenser cela, les insectes hors diptères ont été considérés avec attention et constituent des taxons à enjeu. Un tableau faunistique harmonisé au niveau générique entre les trois régions (sauf dans les cas de genres monospécifiques ou de déterminations plus grossières) a servi de base aux analyses. Le crustacé exotique *Hemimysis anomala* a été retiré du tableau faunistique analysé car c'est une espèce benthopélagique et qu'il n'a pas été reporté dans les listes établies pour le canton de Genève bien qu'il soit observé dans les prélèvements d'août 2024. La liste des taxons fournis par les différents opérateurs est présentée en annexe 1 avec leurs statuts respectifs.

2.2 ANALYSES STATISTIQUES

Quatre indices classiques de diversité ont été calculés à partir des données harmonisées pour l'ensemble des stations : richesse taxonomique, abondance, diversité de Shannon-Weaver et équitabilité.

Les taxons exotiques considérés sont ceux identifiés au moins au genre et qui ne comptent pas d'espèces natives (*Dikerogammarus*, *Chelicorophium*, *Corbicula*, *Dreissena*, *Potamopyrgus*, *Haitia*), ce qui revient à retenir le plus petit niveau taxonomique en commun entre régions. Ainsi, le genre *Gyraulus* a été retenu pour les analyses sans le classer comme exotiques car il peut comprendre *Gyraulus parvus* d'origine nord-américaine, mais également *Gyraulus albus*, espèce indigène.

Pour comparer la composition des communautés benthiques entre stations en août 2024, une matrice de présence/absence a été construite à partir du tableau taxonomique harmonisé. Un indice de dissimilarité de Jaccard a été calculé ($1 - \text{proportion de taxons partagés}$) pour chaque paire de stations. La matrice des similarités a permis de réaliser une classification hiérarchique ascendante (CAH) selon la méthode UPGMA. Le dendrogramme obtenu permet de visualiser les regroupements de stations selon leur composition faunistique.

Pour analyser les cooccurrences en tenant compte des abondances relatives des taxons, nous avons réalisé des Analyses Factorielles des Correspondances sur la matrice harmonisée avec abondances transformées en $\log_2(x + 1)$ pour réduire l'influence des taxons dominants.

Une analyse NMDS (*Non-Metric Multidimensional Scaling*) a été réalisée pour explorer la structuration spatiale et la variation temporelle des communautés benthiques. L'ordination a été réalisée à partir d'une matrice de dissimilarité de Bray-Curtis, construite à partir des abondances totales par date et station (somme sur les profondeurs), également transformées en $\log_2(x + 1)$. L'analyse a été conduite avec une configuration à deux dimensions et un maximum de 200 itérations. Les figures représentent les combinaisons station \times date dans le plan NMDS, avec des regroupements illustrés soit par station, soit par période temporelle agrégée. Ces périodes sont des plages de 3 années consécutives (e.g., 2009–2011, 2012–2014, etc.), choisies pour être identiques en durée, plus 2024 considérée seule. Des centroïdes ont été calculés pour chaque groupe temporel, et des représentations en étoiles permettent de visualiser la dispersion intra-groupe. Les taxons ont été projetés a posteriori dans le plan NMDS pour visualiser leur position sur le plan factoriel.

Enfin, une analyse transversale sur l'ensemble des données disponibles pour le Léman (toutes années et tous sites confondus) a été menée afin d'illustrer la rareté et la distribution très localisée de certains taxons.

3. RÉSULTATS

3.1 ANALYSE DE LA CAMPAGNE RÉALISÉE EN AOÛT 2024

3.1.1 Caractéristiques de la diversité des stations

Le nombre d'invertébrés prélevés sur l'ensemble des échantillons d'une station varie de 2 000 à 5 400 individus selon les sites (Figure 1). La station de Saint-Prex présente une densité largement plus faible d'invertébrés benthiques, avec deux fois moins d'individus qu'ailleurs.

La richesse est très différente entre les stations du canton de Genève qui abritent 21 et 25 taxons respectivement à Versoix-Forel et Quai de Coligny, contre 14 à 17 taxons pour les autres stations (Figure 1). La diversité globale des sites est donc relativement faible au regard du grand nombre d'individus collectés (diversité de Shannon de 1.85 à 2.61, calculée en \log_2), avec des valeurs d'équitabilité faibles (indice de Pielou de 0.49 à 0.63), traduisant la dominance marquée de certains taxons.

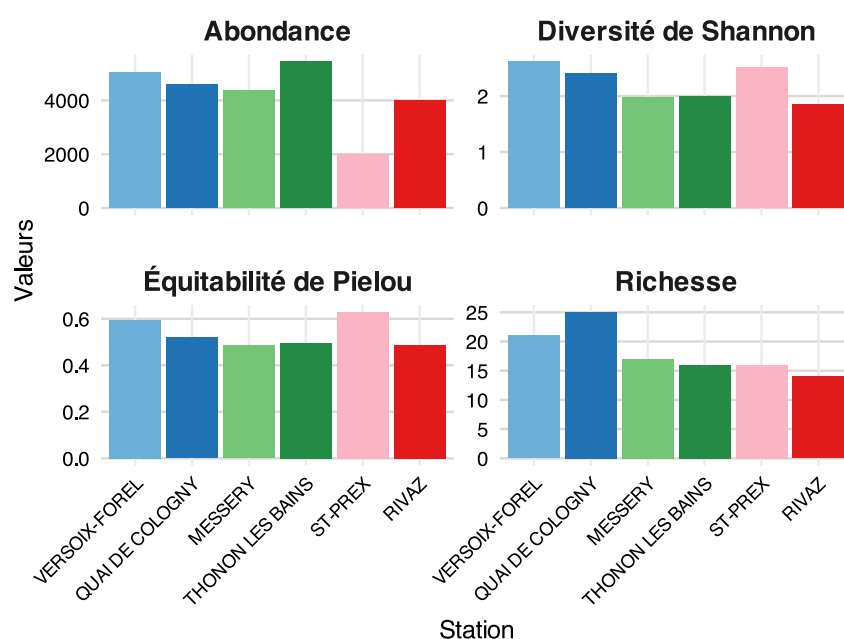


Figure 1 : Indices de diversité des communautés échantillonnées dans les six stations prospectées en août 2024. De gauche à droite : les deux stations du canton de Genève, celles de Thonon Agglomération, puis celles du canton de Vaud.

Figure 1 : Diversity indices for the communities sampled at the six stations surveyed in August 2024. From left to right: the two stations in the canton of Geneva, those in the Thonon Agglomeration, then those in the canton of Vaud.

Pour une profondeur donnée, les richesses sont logiquement plus faibles (Figure 2) : en moyenne 15 taxons, avec entre 9 et 13 taxons sur les quatre sites les plus pauvres, et entre 17 et 18 pour les différentes profondeurs des stations du canton de Genève (à l'exception des profondeurs faibles de Versoix-Forel, où seulement 12 taxons ont été observés). Les profondeurs les plus faibles et proches de la rive (0-1 m) ne sont jamais les plus riches. L'examen des assemblages à différentes profondeurs apparaît donc nécessaire pour obtenir une image plus complète des communautés macrobenthiques d'une station.

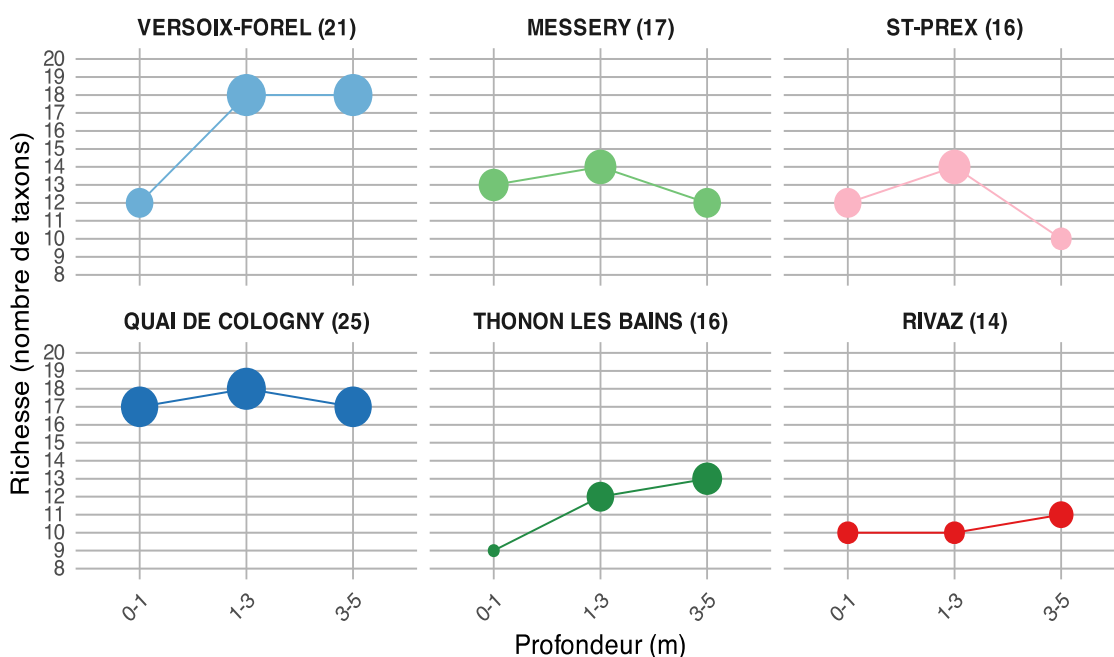


Figure 2 : Richesse taxonomique par profondeur des communautés échantillonnées dans les six stations prospectées. De gauche à droite : les deux stations du canton de Genève, celles de Thonon Agglomération, puis celles du canton de Vaud. Le chiffre à côté du nom indique la richesse totale observée pour chaque station en août 2024. La taille des cercles est proportionnelle à la richesse taxonomique.

Figure 2 : Taxonomic richness by depth of the communities sampled at the six stations surveyed. From left to right: the two stations in the canton of Geneva, those in the Thonon Agglomération, then those in the canton of Vaud. The number next to the name indicates the total richness observed for each station in August 2024. The size of the circles is proportional to the taxonomic richness.

3.1.2 Une présence écrasante des espèces exotiques

Les taxons exotiques échantillonnés en août 2024 sont au nombre de six si l'on considère le niveau de détermination commun à l'ensemble du lac : les crustacés *Chelicorophium* et *Dikerogammarus*, ainsi que les mollusques *Corbicula*, *Dreissena*, *Haitia acuta* et *Potamopyrgus antipodarum*. Ils représentent entre un quart et deux-tiers de la richesse taxonomique observée par station, et plus de 75 % des abondances, à l'exception du site Quai de Cologny (canton de Genève) où leur part n'est que de 21,4 % (Figure 3).

Lors de la campagne d'août 2024, l'analyse porte sur les niveaux génériques (niveau taxonomique retenu pour les stations françaises). Cela ne permet pas d'identifier et analyser les espèces avec un statut préoccupant. La lecture des données brutes révèle une exception à Versoix-Forel, où deux espèces de *Pisidium* correspondaient à des espèces classées (*Pisidium tenuilineatum* (statut VU, vulnérable) et *Pisidium amnicum* (statut NT, potentiellement menacée)).

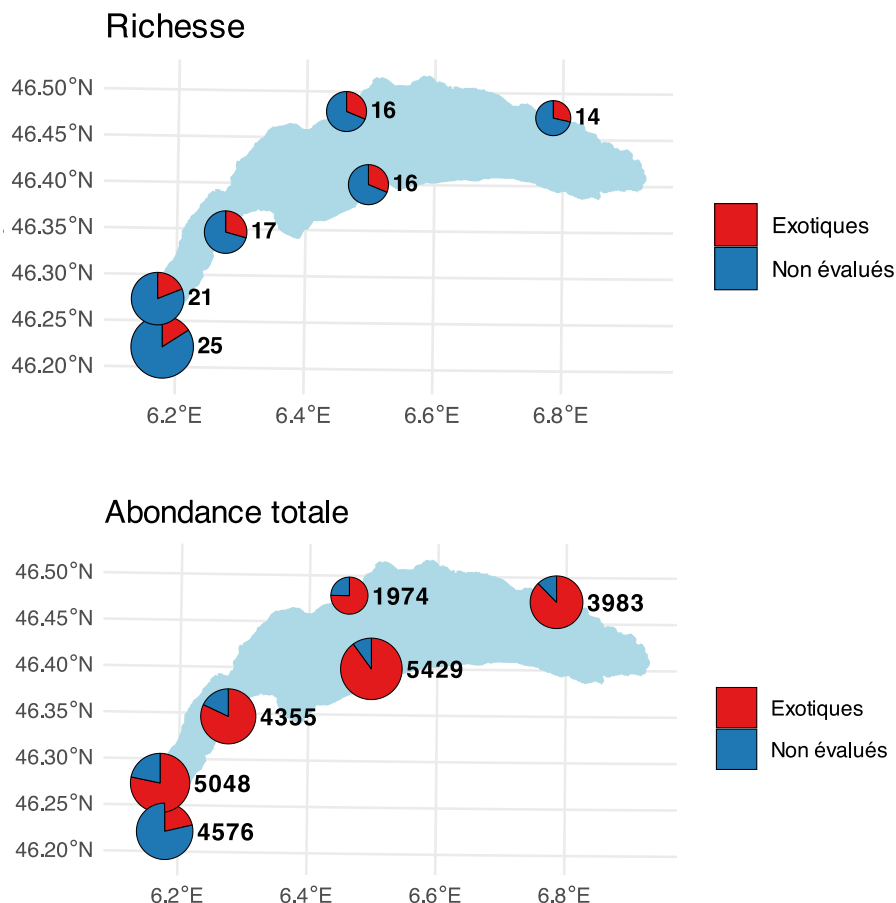


Figure 3 : Cartes de localisation des stations échantillonnées avec une représentation des proportions des macroinvertébrés benthiques exotiques ou non, en termes de richesse et d'abondance totale. Les valeurs de richesse et d'abondance par station sont données à côté de chaque graphique en secteurs. Hormis une observation à Versoix-Forel, les déterminations au niveau du genre ne permettaient pas d'identifier de taxons avec un statut préoccupant.

Figure 3 : Location maps of sampled stations showing the proportions of exotic and non-exotic benthic macroinvertebrates in terms of taxonomic richness and total abundance. The richness and abundance values for each station are given next to each pie chart. With the exception of one observation at Versoix-Forel, genus-level determinations did not allow for the identification of taxa of concern.

Sur les 25 365 invertébrés échantillonnés en 2024, cinq taxons présents sur l'ensemble des sites représentent plus de 90 % des individus observés. Les dreissènes (mollusques bivalves, à plus de 90 % de la moule quagga), *Dikerogammarus villosus* (crustacé amphipode) et *Potamopyrgus antipodarum* (mollusque gastéropode) représentent respectivement 27.4 %, 23.4 % et 20.2 % des individus, soit un total de 71 % des abondances (environ 7 000, 6 000 et 5 100 individus). Ces trois taxons exotiques sont présents massivement à toutes les profondeurs et occupent généralement la couche superficielle du sédiment. Les deux autres taxons les plus abondants appartiennent majoritairement à la faune native (quelques oligochètes exotiques pourraient être présents) et sont davantage enfouis dans le sédiment : 14.6 % d'oligochètes et 5 % de larves de diptères chironomidés (soit environ 3 700 et 1 260 individus). Au-delà, seuls les gastéropodes *Radix sp.* et *Ancylus fluviatilis* sont également présents sur tous les sites (mais pas à toutes les profondeurs), avec seulement 500 et 380 individus observés au total en 2024, respectivement.

Tableau 3 : Effectifs stationnels bruts des six taxons les plus abondants. A titre de comparaison, le complément à l'abondance totale ainsi que le nombre d'autres taxons sont également indiqués.

Table 3 : Gross stationary populations of the six most abundant taxa. For comparison purposes, the complement to total abundance and the number of other taxa are also indicated.

VERSOIX-FOREL	QUAI DE COLOGNY	MESSERY	THONON-LES-BAINS	SAINT-PREX	RIVAZ
<i>Dikerogammarus</i> 1650	Chironomidae 2476	<i>P. antipodarum</i> 2798	<i>Dreissena</i> 2433	<i>Dikerogammarus</i> 705	<i>Dreissena</i> 2233
<i>Dreissena</i> 1190	<i>Oligochaeta</i> 548	<i>Dikerogammarus</i> 473	<i>Dikerogammarus</i> 1840	<i>Dreissena</i> 527	<i>Dikerogammarus</i> 1065
<i>P. antipodarum</i> 1102	<i>P. antipodarum</i> 460	<i>Dreissena</i> 289	<i>P. antipodarum</i> 480	Chironomidae 247	Chironomidae 185
Chironomidae 394	<i>Dreissena</i> 290	<i>Radix</i> 202	Chironomidae 339	<i>P. antipodarum</i> 195	<i>Oligochaeta</i> 146
<i>Radix</i> 234	<i>Dikerogammarus</i> 222	<i>Oligochaeta</i> 133	<i>Oligochaeta</i> 137	<i>Oligochaeta</i> 135	<i>Ancylus fluviatilis</i> 119
<i>Oligochaeta</i> 164	<i>Pisidium</i> 145	<i>Haitia acuta</i> 132	<i>Chelicorophium</i> 129	<i>Ancylus fluviatilis</i> 54	<i>Chelicorophium</i> 112
Autres taxons 314	435	328	71	111	123
Richesse restante 15	19	11	10	10	8

Les dreissènes sont globalement très abondantes, mais cela ne reflète pas nécessairement leur rang dans les assemblages : elles ne dominent en abondance que sur les sites de Rivaz et Thonon-les-Bains (Tableau 3). Ailleurs, parmi les espèces exotiques, c'est *P. antipodarum* (à Messery) ou le crustacé *Dikerogammarus* (à Saint-Prex et Versoix-Forel) qui dominant.

Les abondances totales de dreissènes varient fortement selon la profondeur, mais sont toujours plus élevées à 3-5 m, avec un minimum observé de 100 individus et un maximum de 1 100 individus (Figure 4). La densité de dreissènes est très nettement plus faible (4, 6 et 12 individus respectivement) à Thonon-les-Bains, Quai de Cologny (canton de Genève) et Messery (Thonon Agglomération). Pourtant, les abondances totales des invertébrés y sont comparables à celles des autres stations. A Quai de Cologny, ce sont les diptères Chironomidae qui dominant, tandis qu'à Messery, c'est le gastéropode exotique *Potamopyrgus antipodarum* (Tableau 3).

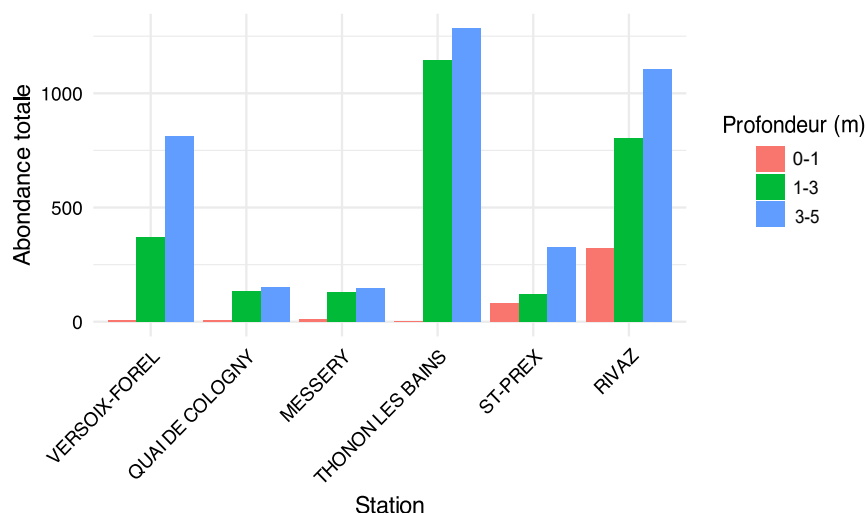


Figure 4 : Abondance des dreissènes par station et par profondeur. Données d'août 2024.

Figure 4 : Abundance of dreissenids by station and depth. Data from August 2024.

Si l'on examine la richesse en taxons par station et profondeur en fonction de l'abondance des Dreissènes (exprimée en log base 2), aucune corrélation n'est trouvée compte tenu de l'influence de la station et de la profondeur (Figure 5A). On constate par exemple un regroupement des profondeurs, avec les échantillons issus des 0-1 m sur la partie gauche du graphique, là où les densités de dreissènes sont les plus faibles. Aucun lien clair n'émerge entre l'abondance des Dreissènes et la richesse en taxons à cette échelle. Lorsque l'on regroupe les données des différentes profondeurs à l'échelle des stations, les sites les plus densément colonisés par les Dreissènes tendent à être les plus pauvres en taxons, mais la tendance, bien que décroissante, n'est pas significative (Figure 5B - Corrélation de Spearman : $\rho = -0.58$, $p = 0.987$). Avec 6 points la puissance statistique est faible, ces résultats doivent être considérés avec prudence.

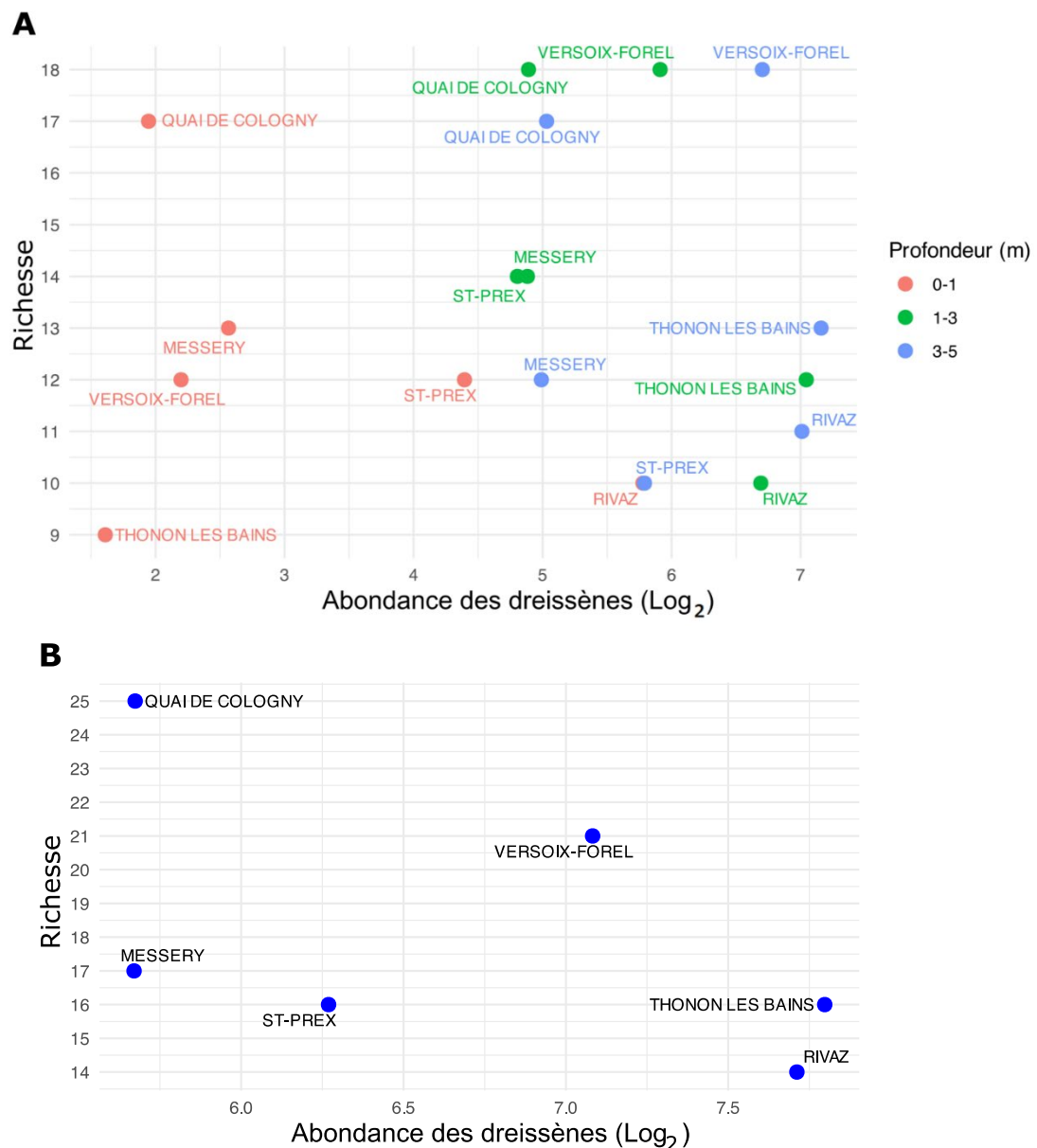


Figure 5 : Richesse en taxons en fonction de l'abondance des Dreissena (\log_2). A) valeurs par profondeur, et B) valeurs à l'échelle des stations.

Figure 5 : Taxonomic richness as a function of Dreissena abundance (\log_2). A) values by depth, and B) values at the station scale.

3.1.3 Beaucoup de taxons rares

Au sein de l'ensemble des échantillons de l'été 2024, 21 taxons n'ont été observés qu'avec des effectifs très faibles (moins de 10 individus sur l'ensemble des stations). Dix d'entre eux comptent seulement 1 ou 2 individus. Il peut s'agir de taxons pourtant très communs comme le crustacé *Asellus aquaticus* (1 individu) ou la sangsue *Piscicola geometra*, de très petits organismes comme les hydracariens, ou de quelques insectes comme le trichoptère *Tinodes waeneri*.

Plus globalement, si l'on retire les *Dreissena* pour évaluer le reste, les assemblages d'invertébrés peuvent être regroupés en trois grands ensembles : les crustacés d'une part (incluant les taxons invasifs *Dikerogammarus* et *Chelicorophium*), les ETCLO d'autre part (Ephéméroptères, Trichoptères, Coléoptères, Lépidoptères et Odonates), et un troisième groupe avec les autres taxons (MOD, pour désigner les Mollusques hors dreissènes, les Oligochètes et les Diptères). Les ETCLO, qui comprennent des insectes souvent exigeants sur le plan écologique, sont très faiblement représentés, quel que soit le site (Figure 6), avec un effectif maximal ne dépassant pas 60. Ces taxons sont généralement plus fréquents dans les faibles profondeurs, mais les stations du canton de Genève hébergent aussi ces taxons à des profondeurs plus importantes.

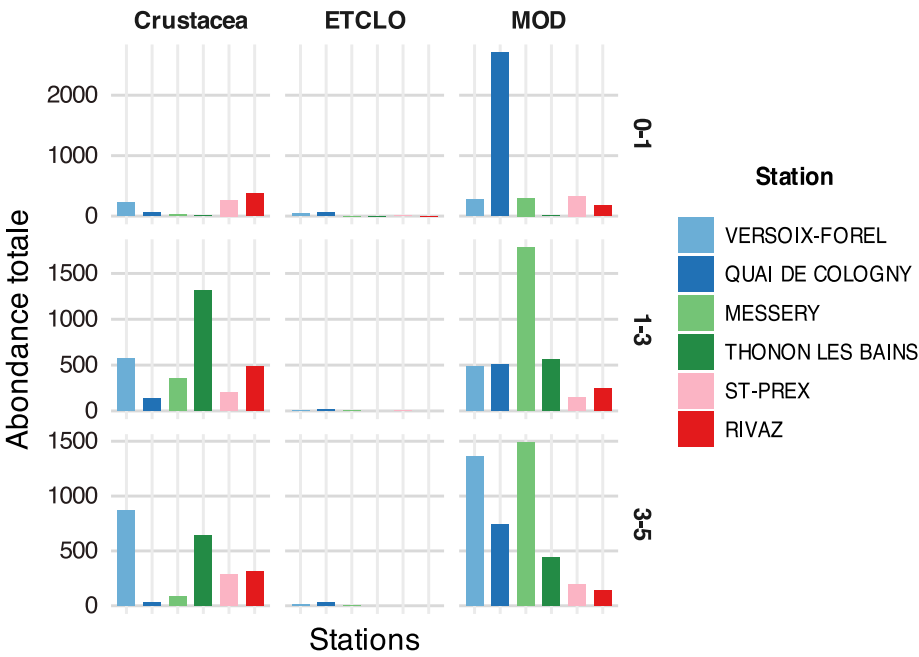


Figure 6 : Abondance de trois grands groupes biologiques en fonction de la profondeur (0-1, 1-3 et 3-5 m) sur six stations: crustacés (graphique de gauche), insectes non-diptères (Ephéméroptères, Trichoptères, Coléoptères, Lépidoptères, Odonates – ETCLO, au centre) et les mollusques non dreissènes regroupés avec les oligochètes et les diptères (à droite, MOD).

Figure 6 : Abundance of three major biological groups according to depth (0-1, 1-3, and 3-5 m) at six stations: crustaceans (left graph), non-dipteran insects (Ephemeroptera, Trichoptera, Coleoptera, Lepidoptera, Odonata – ETCLO, center) and non-dreissenid mollusks grouped with oligochaetes and diptera (right, MOD).

3.1.4 La singularité des observations du canton de Genève

Les communautés de macroinvertébrés présentent des similarités entre les stations allant de 30 à 58 %. Les deux stations du canton de Genève (Versoix-Forel et Quai de Cologny) se distinguent nettement des quatre autres (Figure 7). Ce résultat est en partie lié à la présence de taxons spécifiques à ces sites, observés sur ces stations mais que l'on ne trouve pas ailleurs, ou pas ensemble ailleurs, contribuant à leur richesse plus élevée.

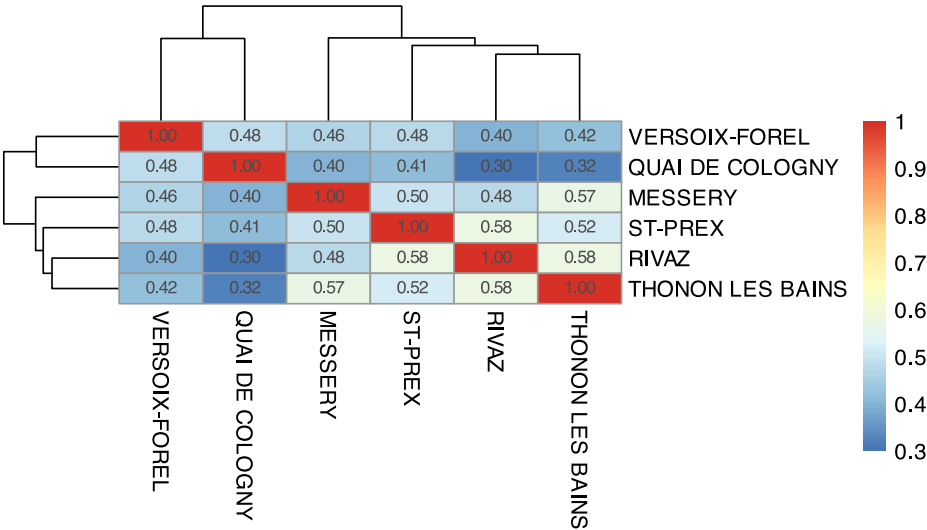


Figure 7 : Similarités de Jaccard calculées entre stations (données d'août 2024) et classification hiérarchique basée sur ces valeurs.

Figure 7 : Jaccard similarities calculated between stations (data from August 2024) and hierarchical classification based on these values.

Une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) permet d'illustrer les particularités des stations. Les deux premiers axes du plan factoriel de l'AFC, appliquée aux 18 couples station/profondeur et aux 41 taxons, représentent respectivement 19.5 % (axe 1) et 13 % (axe 2) de l'inertie totale, soit une part cumulée de 32.5 %. Le centre du plan regroupe logiquement les taxons très communs, partagés par l'ensemble des sites. L'axe 1 discrimine clairement les stations du canton de Genève des autres, qui apparaissent plus proches entre elles. La présence d'éphéméroptères (*Caenis*, Baetidae dont *Cloeon*), de gastéropodes (*Physidae*, *Gyraulus*, *Valvata*), ou de trichoptères (*Polycentropodidae*, *Hydroptilidae*, *Psychomyiidae*) est relativement typique des stations genevoises. A l'opposé, les coléoptères du genre *Stenelmis* et les nématodes contribuent à la singularité des données de Thonon-les-Bains. L'axe 2 sépare surtout les différents échantillons des sites de Versoix-Forêt et Quai de Cologny, en opposant aux périphéries du plan les deux échantillons des profondeurs les plus importantes (3 à 5 m). Les *Bithynia*, hydracariens et *Polycentropodidae*, sont ainsi opposés aux Baetidae, *Valvata* et Gammaridae.

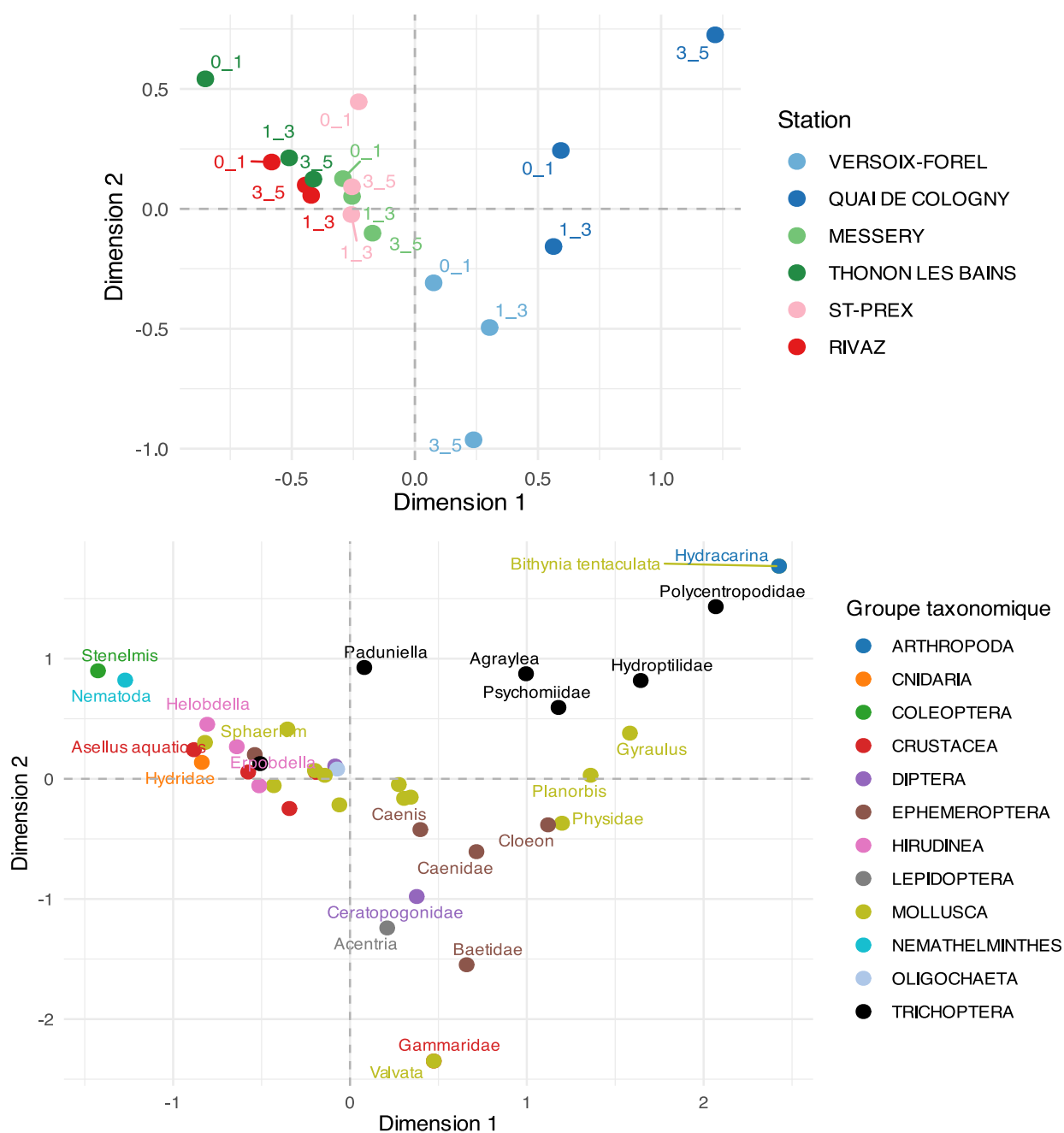


Figure 8 : Premier plan factoriel de l'AFC réalisée sur le tableau des 41 taxons et 18 combinaisons station-profondeur. Pour plus de lisibilité, seuls 60 % des taxons les plus contributifs sont affichés avec leurs noms.

Figure 8 : First factorial plan of the PCA performed on the table of 41 taxa and 18 station-depth combinations. For greater clarity, only the 60% of taxa that contribute most significantly are displayed with their names.

3.1.5 Des données estivales 2024 peu différentes des autres campagnes de l'année

L'examen des taxons communs aux campagnes d'août, de février (canton de Genève) et de novembre (canton de Vaud) montre que les données de février présentent 8 taxons nouveaux (16 %) : le coléoptère *Limnius*, les mollusques *Ferrissia* et *Viviparus*, des trichoptères déterminés à la famille -Leptoceridae et Limnephilidae, les genres de trichoptères *Chaetopteryx*, *Potamophylax* et *Oecetis*. Les listes de novembre ne présentent pas de taxons nouveaux par rapport à ce qui est échantillonné en août. Hormis les 20 coléoptères *Limnius* chacun de ces taxons a été observé avec une abondance de 1 à 5 individus seulement.

Plus globalement, les assemblages de macroinvertébrés des stations du canton de Genève sont de nouveau les plus riches et diversifiés, tandis que celles du canton de Vaud apparaissent globalement plus pauvres, mais les dates hors période estivale étaient également différentes.

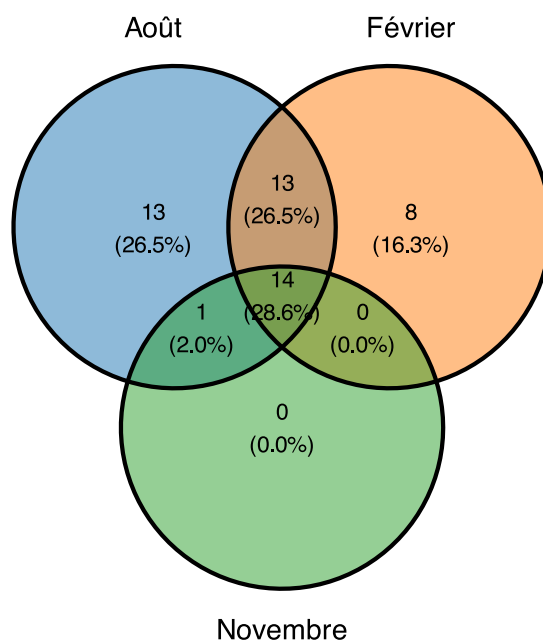


Figure 9 : Diagramme de Venn des taxons observés selon les campagnes d'échantillonnage de 2024 : août (campagne principale), février (canton de Genève) et novembre (canton de Vaud).

Figure 9 : Venn diagram of taxa observed during the 2024 sampling campaigns: August (main campaign), February (canton of Geneva), and November (canton of Vaud).

3.2 DYNAMIQUE TEMPORELLE

Les stations des cantons de Vaud et de Genève ont fait l'objet d'investigations antérieures qui permettent d'évaluer une dynamique temporelle. Les interprétations doivent toutefois tenir compte de possibles différences de protocole d'échantillonnage ; ce sont donc surtout les changements globaux de composition qui sont ici investigués.

Quelle que soit la station considérée, les abondances totales peuvent varier d'un facteur 4 selon les années, voire davantage : à Rivaz, les effectifs varient entre 1 000 et 20 000 individus (Figure 10). Il faut garder à l'esprit que ces abondances sont sous-estimées et qu'une part de leurs variations est potentiellement liée à un biais d'échantillonnage car, par exemple, une proportion de moules quagga peut rester accrochée au substrat.

Les communautés de macroinvertébrés du canton de Genève ne dépassent jamais 6 500 individus, tandis qu'au sein du canton de Vaud, trois fois plus d'individus peuvent être observés. A Genève, les taxons qui ne sont pas invasifs (c'est-à-dire hors exotiques envahissants) sont encore bien représentés dans les relevés récents. Quelle que soit la station, les espèces exotiques étaient déjà très majoritaires dans les communautés les plus anciennes. Les données de la station de Saint-Prex en 2010 et 2011 sont particulières car elles contiennent uniquement deux taxons exotiques (*Dikerogammarus* et *Chelicorophium*). La moule zébrée, *Dreissena polymorpha*, introduite dans les années 1960 dans le Léman, représentait déjà une part importante (> 20 %) des abondances dans les échantillons les plus anciens.

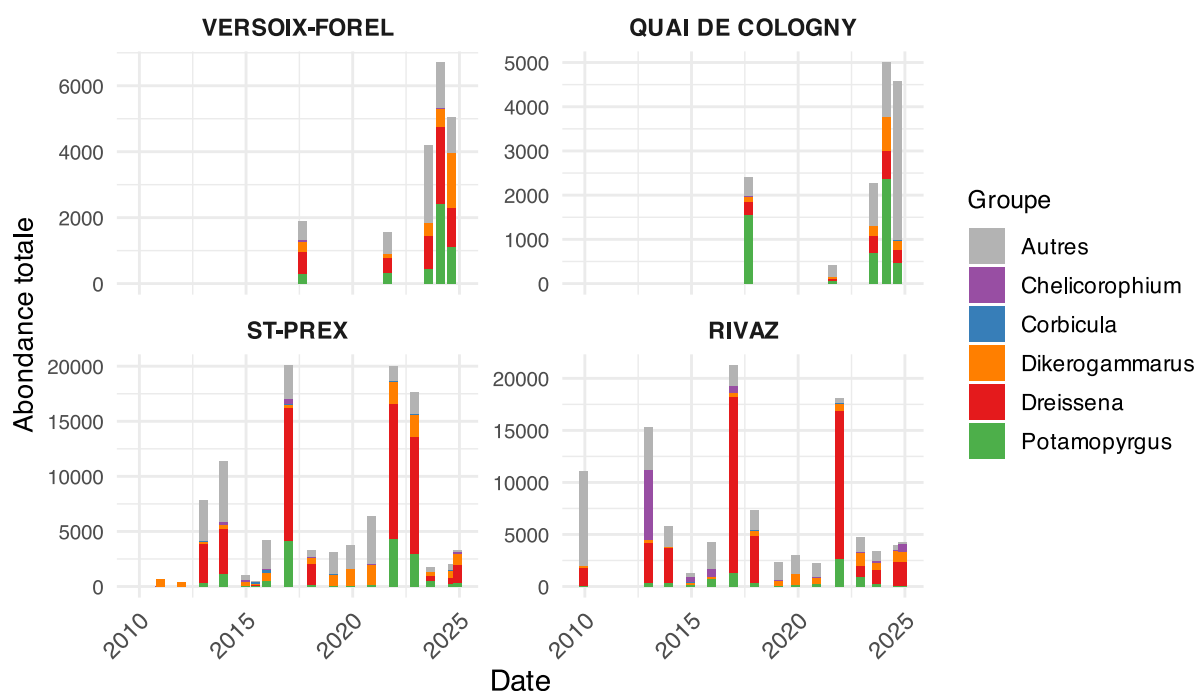


Figure 10 : Abondances d'une sélection de taxons invasifs par rapport aux abondances totales au sein des communautés (sommet de chaque barre d'histogramme).

Figure 10 : Abundances of a selection of invasive taxa relative to total abundances within communities (top of each bar chart).

L'analyse en coordonnées non métriques (NMDS) a permis d'explorer les variations temporelles de composition des communautés benthiques. La statistique qui évalue la pertinence de l'analyse (stress final de la solution bidimensionnelle de 0.078) indique une bonne qualité de représentation des distances dans le plan. L'ordination montre une structuration spatio-temporelle marquée. Les stations du canton de Genève, proches entre elles, se séparent nettement de celles du canton de Vaud (Figure 11).

L'étalement plus vaste des stations-dates de Saint-Prex et Rivaz est lié à la plus grande plage temporelle prise en compte, avec des données historiques de 2009, 2013, 2014, 2015, 2016, alors que les données les plus anciennes de Quai-de-Coligny et Versoix-Forel remontent à 2017. La première observation dans le Léman de *Dikerogammarus villosus* date de 2002, celle de *Chelicorophium curvispinum* de 2010, celle de la moule quagga, (*Dreissena rostriformis bugensis*) de 2015 (Lods-Crozet, 2020). La plage temporelle des données du canton de Genève ne remonte, par conséquent, pas à une période sans quagga. Un examen des données de base confirme que dès 2017 des individus de quagga étaient échantillonnés sur les deux stations du canton de Genève.

Un élément étonnant est toutefois que la moule zébrée est toujours présente en 2024, avec quelques individus observés sur les sites genevois et vaudois en sympatrie avec la quagga. La plage temporelle des données du canton de Vaud couvre les deux périodes, avec et sans quagga. Pour autant, comme illustré sur la Figure 10, les proportions de dreissènes avant l'installation de la quagga était déjà très significative entre 0 et 5 m, du fait des proliférations de moules zébrées.

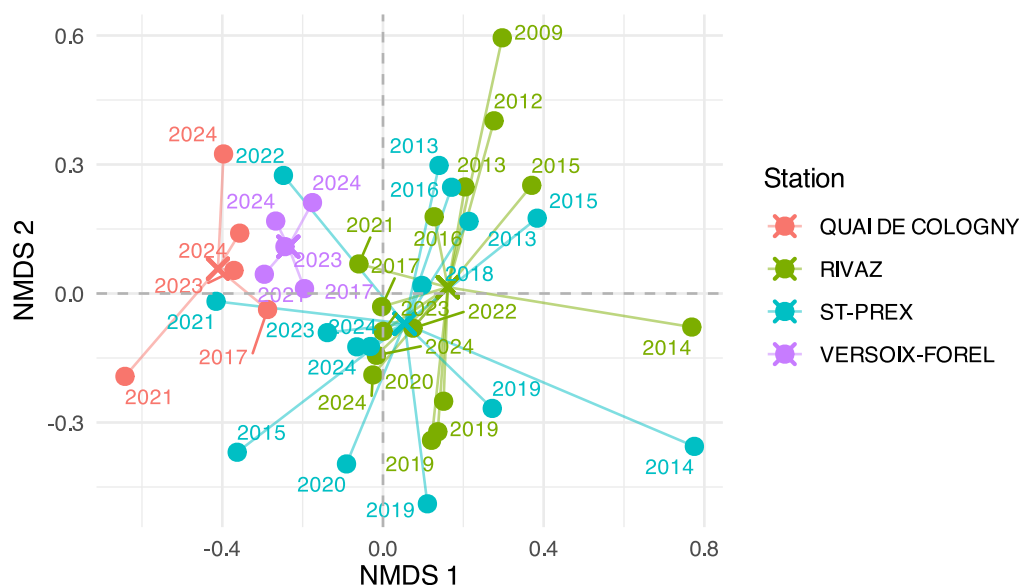


Figure 11 : Premier plan factoriel d'une analyse NMDS des communautés d'invertébrés benthiques échantillonnées entre 2009 et 2024 sur 4 stations des cantons de Genève et de Vaud. Les segments relient les points correspondant à une même station, quelle que soit l'année ; la croix marque le centroïde de chaque station.

Figure 11 : First factorial plane of an NMDS analysis of benthic invertebrate communities sampled between 2009 and 2024 at four stations in the cantons of Geneva and Vaud. The segments connect the points corresponding to the same station, regardless of the year; the cross marks the centroid of each station.

Au niveau temporel, un premier résultat marquant est que, dans l'ensemble, l'année 2024 ne se distingue pas des années 2021 à 2023 (Figure 12). En examinant uniquement les stations avec un suivi long, un second résultat notable est la nette évolution des communautés benthiques à Saint-Prex et Rivaz : la période 2012-2014 est bien distincte de la plage temporelle 2018-2020, ainsi que des années 2021 et suivantes. Pour les années les plus récentes les différentes stations sont resserrées sur le plan, ce qui reflète une baisse de la diversité inter-sites (diversité bêta).

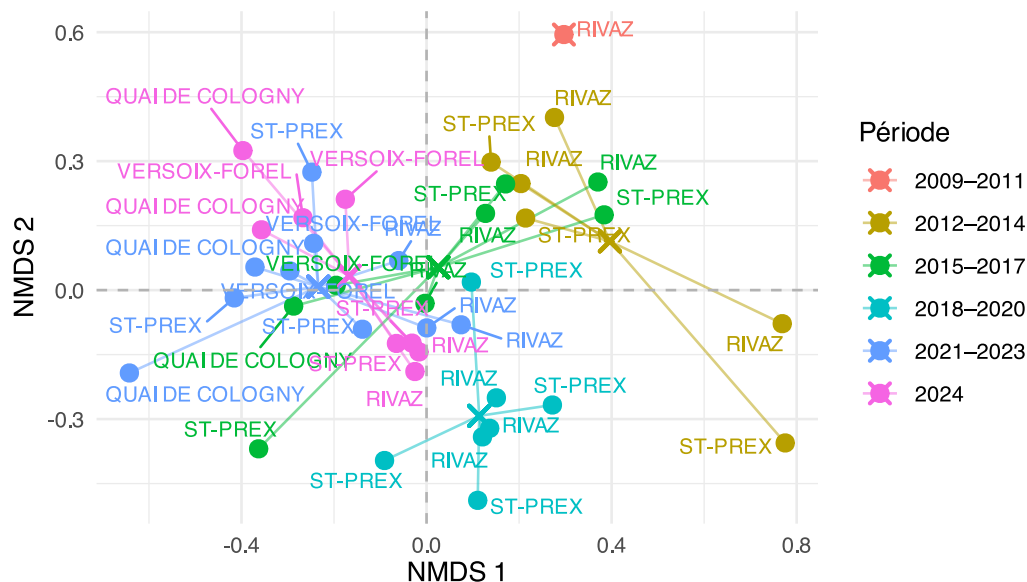


Figure 12 : Premier plan factoriel d'une analyse NMDS des communautés d'invertébrés benthiques, avec un regroupement en étoile des stations par période de trois ans, l'année 2024 étant considérée séparément.

Figure 12 : First factorial plane of an NMDS analysis of benthic invertebrate communities, with stations grouped in a star pattern by three-year period, with 2024 considered separately.

Les communautés des stations du canton de Genève les plus récentes sont marquées par la présence de *Dreissena* mais également par le gastéropode *Potamopyrgus* et les bivalves *Pisidium* (Figure 13, partie en haut à gauche). Rivaz et Saint-Prex, entre 2018 et 2020, hébergent de fortes abondances de l'amphipode *Dikerogammarus*, mais aussi des *Ancylus fluviatilis* et quelques insectes plus rares à l'échelle du lac (partie inférieure de la Figure 13). Les échantillons plus anciens comportent plusieurs taxons non retrouvés ensuite, comme des sangsues, des planaires, les insectes Trichoptères *Glossiphonia* ou *Mystacides*, ainsi que le bivalve natif *Anodonta anatina*.

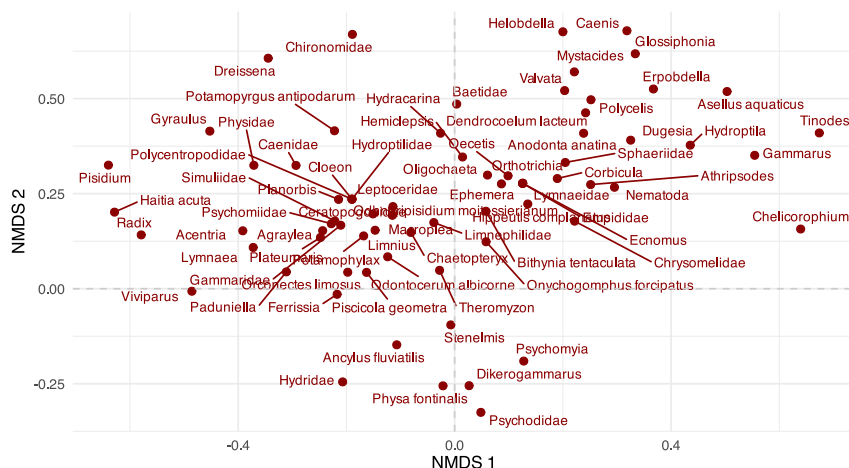


Figure 13 : Position des taxons sur le premier plan factoriel de l'analyse NMDS des communautés d'invertébrés benthiques de l'analyse temporelle des stations suisses (complément des Figures 11 et 12).

Figure 13 : Position of taxa on the first factorial plane of the NMDS analysis of benthic invertebrate communities from the temporal analysis of Swiss stations (supplement to Figures 11 and 12).

A Rivaz, les variations de richesse au fil du temps révèlent une rupture nette avant et après 2017 (Figures 14 et 15). Alors que le nombre de taxons observés pouvait atteindre 33 en 2012, il ne dépasse plus 18 après 2017. Sur chacune des deux périodes, le nombre total de taxons observé passe de 41 taxons avant 2017 à 26 taxons après 2017. Les taxons qui ne sont plus observés incluent notamment plusieurs insectes trichoptères comme les genres *Hydroptila*, *Mystacides* ou *Tinodes*. A Saint-Prex, on observe une dynamique similaire en termes de richesse annuelle, mais avec une amplitude plus faible. En revanche, le nombre total de taxons observés reste stable entre les deux périodes (environ 40 taxons). Les taxons non retrouvés sur ces sites après 2017 étaient peu abondants, qu'ils soient exotiques (Figure 10) ou natifs, y compris des diptères Chironomidae (Figure 15).

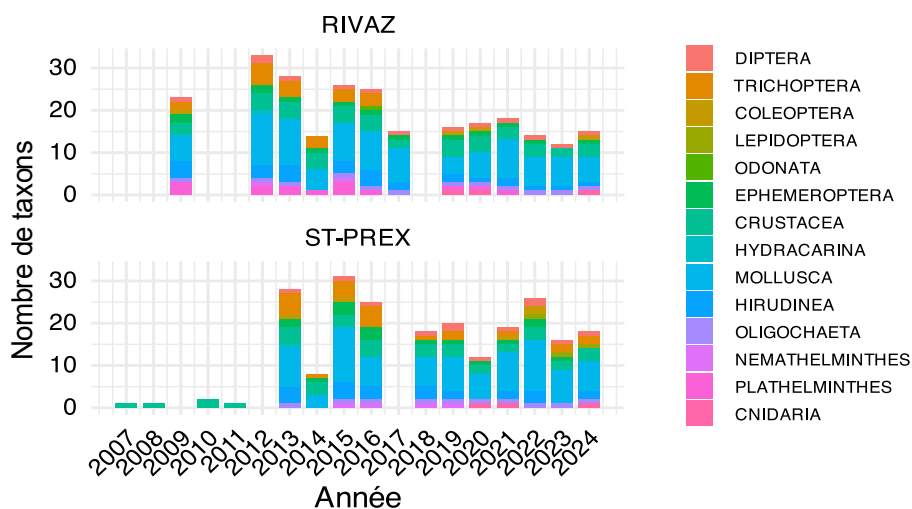


Figure 14 : Richesse taxonomique des communautés de macroinvertébrés benthiques des stations Saint-Prex et Rivaz au fil du temps, toutes profondeurs confondues.

Figure 14 : Taxonomic richness of benthic macroinvertebrate communities at the Saint-Prex and Rivaz stations over time, all depths combined.

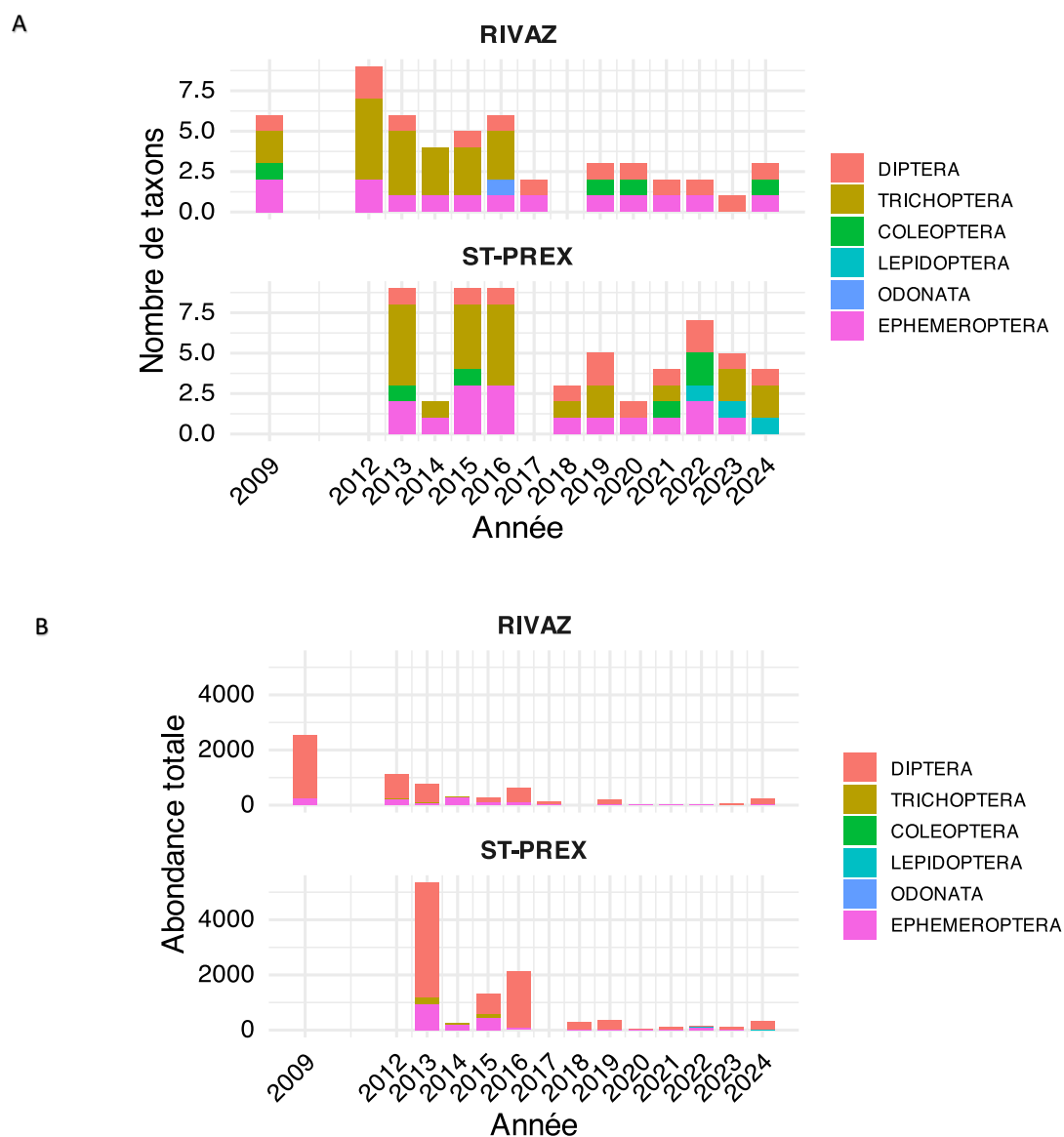


Figure 15 : A) Richesse taxonomique et B) abondances des principaux groupes d'insectes aquatiques des stations Saint-Prex et Rivaz au fil du temps, toutes profondeurs confondues.

Figure 15 : A) Taxonomic richness and B) abundances of the main groups of aquatic insects at the Saint-Prex and Rivaz stations over time, all depths combined.

Ces résultats ne sont pas singuliers, car la majorité des insectes éphéméroptères, trichoptères, coléoptères, lépidoptères et odonates sont rares à l'échelle du lac (Figure 16). Cette rareté est relative à la fois au faible nombre de stations où ils sont observés et à leurs très faibles abondances. En prenant en compte l'ensemble des données disponibles - tous sites, années et protocoles confondus -, on constate que de nombreux taxons n'ont été observés que de façon très sporadique et localisée (Figure 16).

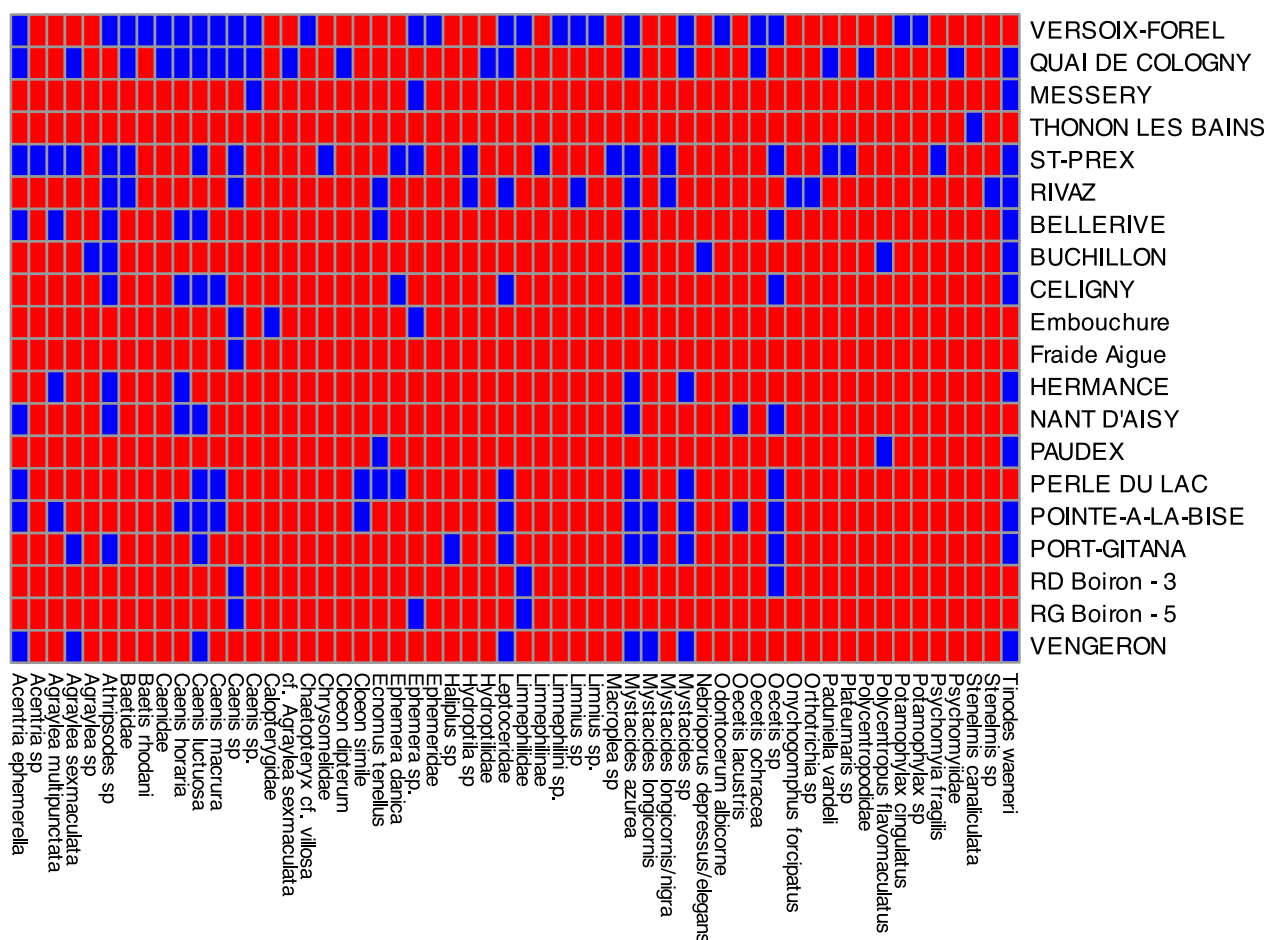


Figure 16 : Présentation des taxons appartenant aux insectes éphéméroptères, trichoptères, coléoptères, lépidoptères et odonates, sur l'ensemble des données mises à disposition pour le Léman, en cumulant toutes les dates d'échantillonnage. Les niveaux de détermination sont ceux des fichiers bruts, ce qui peut entraîner des redondances entre genres et espèces. Les présences sont représentées par des rectangles bleus et les absences par des rectangles rouges.

Figure 16 : Presentation of taxa belonging to the orders Ephemeroptera, Trichoptera, Coleoptera, Lepidoptera, and Odonata, based on all data available for Lake Geneva, combining all sampling dates. The levels of determination are those of the raw files, which may result in redundancies between genera and species. Presences are represented by blue rectangles and absences by red rectangles.

Une manière simple d'illustrer les changements qui se mettent en place sur le lac est de représenter un nuage de points avec en abscisse la proportion d'individus qui appartiennent à des taxons exotiques et en ordonnée la richesse en espèces natives (Figure 17). La clé de lecture est dans la diagonale : une banalisation s'opère si une station se déplace vers le bas (perte de taxons natifs) et vers la droite du graphique (augmentation des abondances en exotiques). On retrouve un contraste assez fort entre les derniers inventaires des stations genevoises, relativement diversifiées, et vaudoises, avec une diversité souvent bien plus faible. Il n'est pas possible de tracer une trajectoire simple pour un site donné, mais hormis la communauté prélevée à Quai de Coligny en 2024, les données récentes sont plutôt sur la droite des graphiques.

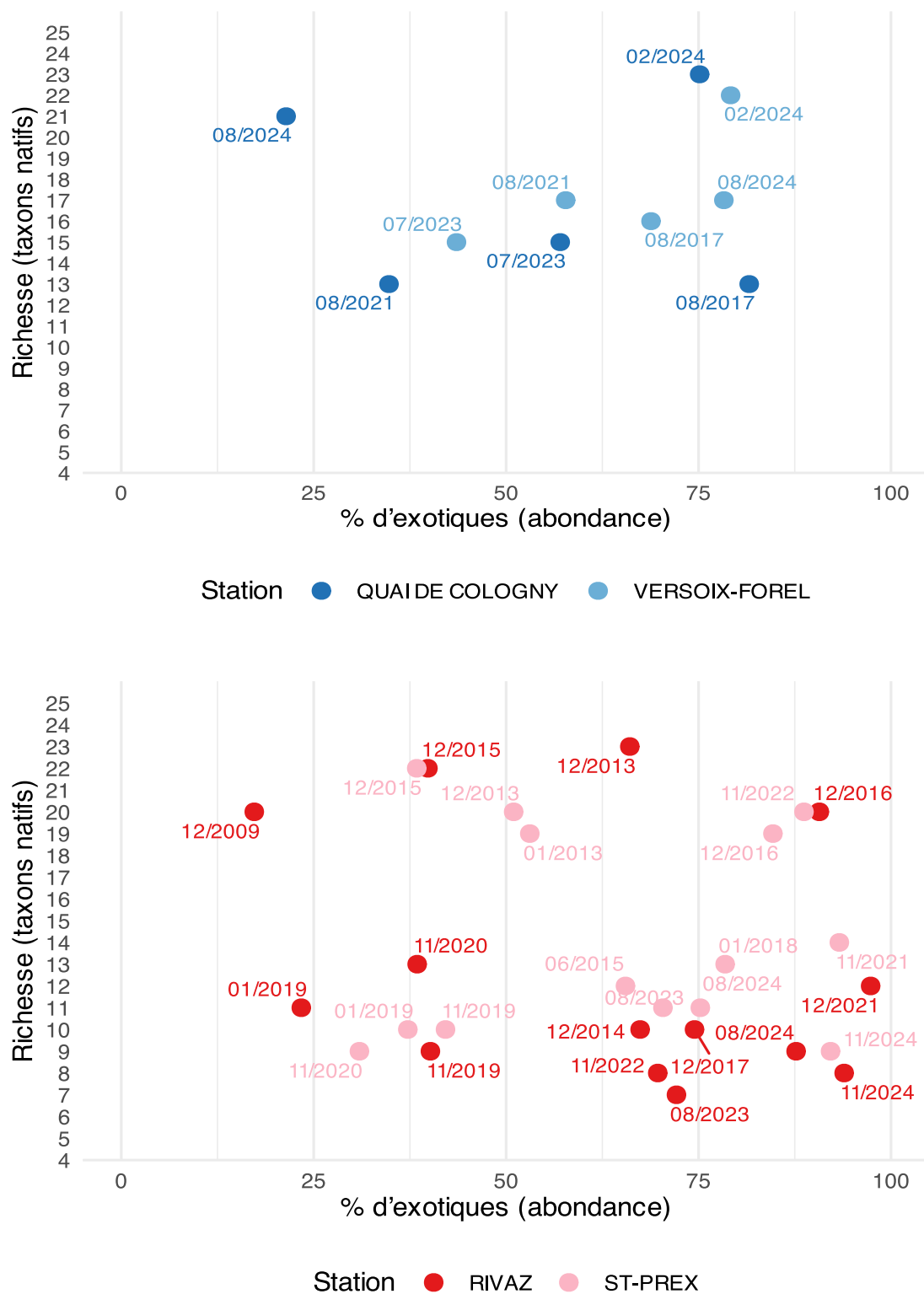


Figure 17 : Nuage de points illustrant la banalisation pour les stations du canton de Genève (gauche) et du canton de Vaud (droite). Les libellés désignent une combinaison mois/année de prélèvement d'une communauté de macroinvertébrés benthiques. Plus un point est sur la droite, plus les espèces exotiques sont dominantes en termes d'abondance. Plus un point est situé vers le haut, plus il représente une communauté diversifiée en espèces natives.

Figure 17 : Scatter plot illustrating biotic homogenization for stations in the canton of Geneva (left) and the canton of Vaud (right). The labels refer to a month/year combination for sampling a community of benthic macroinvertebrates. The further to the right a point is, the more dominant exotic species are in terms of abundance. The higher a point is, the more diverse the community of native species is.

4. DISCUSSION

Des communautés dominées par des taxons exotiques mais encore différenciées : le paradoxe benthique du Léman

La faune macrobenthique du Léman échantillonnée en août 2024 comprend une très forte abondance d'espèces exotiques et une richesse globale de 41 taxons (détermination au niveau générique en général et hors Chironomidae et Oligochaeta).

Les données de Thonon Agglomération et du canton de Vaud sont très comparables : les richesses observées localement sont de 14 à 17 taxons, avec au niveau des abondances au moins 75 % des individus qui appartiennent à des espèces exotiques. C'est relativement pauvre pour le littoral d'un grand lac. A titre de comparaison, sur le littoral encore assez naturel du lac de Neuchâtel, qui peut servir de référence, 34 taxons sont observés sur une seule station (nommée Chez-le-Bart) échantillonnée pendant l'été 2024 (2 568 individus dont 1984 individus (77 %) d'espèces exotiques, données recueillies par le canton de Vaud).

Les stations du canton de Genève hébergent des communautés assez différentes des autres stations : plus riches en espèces (21 et 25 taxons dont plus d'insectes qu'ailleurs), avec seulement 21 % des individus appartenant à des taxons exotiques à Quai-de-Cologny. Les taxons qui n'ont été observés que sur les stations du canton de Genève (Annexe 1) appartiennent par exemple aux Trichoptères (Polycentropodidae, Pyschomyidae), aux éphéméroptères (Baetidae) ou aux gastéropodes (*Bithynia*, *Valvata*, *Gyraulus*, Planorbidae). Ce résultat est un peu paradoxal car, par rapport à d'autres sites, le littoral genevois présente un caractère relativement artificiel. Cependant, le petit lac bénéficie d'un brassage annuel qui réoxygène ses eaux et la faible profondeur de la beine lacustre favorise la présence d'une grande diversité de macrophytes.

Les taxons exotiques dominants sont des mollusques et crustacés, les deux groupes qui comprennent le plus d'espèces exotiques (Devin et al., 2005). La moule quagga, dont les populations sont toujours en expansion (Kraemer et al., 2023), occupe une place prépondérante mais en effectifs le crustacé *Dikerogammarus villosus* et le gastéropode *Potamopyrgus antipodarum* sont très abondants aussi (respectivement 27, 23 et 20 % des individus observés sur l'ensemble. La situation serait assez similaire sur le lac de Neuchâtel (com. pers. canton de Vaud). Ces trois taxons exotiques représentent à eux seuls 71 % des individus échantillonnés. Il est finalement assez remarquable que malgré le processus d'homogénéisation qui est en cours par la prolifération des mêmes espèces exotiques partout et par la réduction des richesses locales, les stations restent différentes les unes des autres en termes de communautés de macroinvertébrés benthiques (30 à 58 % de similarité entre stations).

Au-delà des différents stress que peut subir la faune benthique, les taxons exotiques exercent assurément une pression forte (Lods-Crozet et al., 2013). La moule quagga est une espèce ingénieuse qui modifie les conditions de son milieu sur de multiples aspects (voir la synthèse de Beisel, 2021, Karatayev & Burlakova, 2025), changeant ainsi la qualité des habitats en place. Mais avant son arrivée, l'amphipode *Dikerogammarus* avait vraisemblablement déjà modifié les communautés benthiques. *Dikerogammarus* est en effet une espèce très prolifique et un prédateur vorace (Dick et al., 2002) qui a déjà engendré un appauvrissement des assemblages là où il prolifère (Bollache et al., 2004). Son expansion au sein du Léman a déjà été investigué avec un impact rapporté sur les gammarus autochtones et une menace certaine sur la faune du littoral (Lods-Crozet & Reymond, 2006). Un fort impact de *Dikerogammarus* sur la faune native du Lac de Constance a également déjà été rapporté (Gergs & Rothhaupt, 2015). L'incidence de *Dikerogammarus* en présence de la quagga est peu documentée et mériterait sans doute des investigations. Les proliférations de *P. antipodarum* ont surtout une incidence sur la faune benthique via son régime alimentaire détritivore-herbivore et par compétition pour l'habitat (Geist et al., 2022), par exemple avec des espèces lithales comme *Ancylus fluviatilis*. C'est par ailleurs une ressource alimentaire de mauvaise qualité pour les poissons (Geist et al., 2022). Une conséquence de la prolifération de ces taxons exotiques est que l'on a aujourd'hui une faune épi-benthique très bien représentée en nombre et biomasse, alors que sur la plupart des stations la faune endo-benthique relictuelle (faune fousseuse ou des interstices) est bien moins abondante.

Les comparaisons spatio-temporelles avec des données antérieures sont à considérer avec précaution car les efforts de capture, les profondeurs investiguées et les saisons d'échantillonnage sont différentes du protocole de la campagne d'été 2024. Des suivis dans le temps étaient seulement disponibles pour les cantons de Genève et de Vaud. Malgré ces réserves, l'exercice de comparaison montre que l'été 2024 ne restitue pas une image très différente des communautés qui ont été observées entre 2021 et 2023. En revanche, les données les plus récentes sont moins riches que celles du passé. Les stations du canton de Vaud permettent une analyse avec la plus grande profondeur temporelle puisqu'on peut remonter le temps sur une période de 11 ans.

A Rivaz, une part importante des taxons disparaît des communautés observées après 2017, notamment des genres d'insectes Trichoptères sensibles. Le déclin de *Tinodes waeneri* était déjà signalé par Lods-Crozet (2020), de même que celui des aselles et d'éphéméroptères. De même, dans les stations du Léman du canton de Genève, des suivis à l'espèce menés en 2017 et en 2021 avec le même protocole ne permettent pas de retrouver entre ces deux dates certains taxons et tout particulièrement des trichoptères (Biol'Eau, 2022). Il est délicat d'aller très loin dans ces analyses mais ces éléments suggèrent une érosion, entre autres, de certains insectes au fil du temps, avec un point de bascule probable autour des débuts de la prolifération de la quagga (observée en 2015 pour la première fois). Des taxons généralement très communs comme des sangsues, planaires et crustacés *Asellus aquaticus* sont également devenus très rares, sans que l'on sache exactement les rôles respectifs de la quagga et du crustacé *Dikerogammarus* dans ces changements.

La diversité de ce qui reste des 25 000 individus échantillonnés une fois que l'on retire les individus d'espèces exotiques est précisément représenté par des taxons rares : une présence généralement localisée et de très faibles abondances de quelques individus. Ainsi, 21 des 41 taxons observés ont moins de 10 individus échantillonnés sur l'ensemble du lac et 18 taxons sont exclusivement présents sur une seule station. Les taxons à enjeux sont ceux qui possèdent un statut de protection, dont on sait qu'ils sont menacés, et ceux qui sont exigeants vis-à-vis de leurs conditions de vie. Les statuts étant donnés à des espèces, l'analyse générique n'a pas permis de dresser une image à l'échelle du lac. Si l'on retourne aux données avant concaténation entre les opérateurs, il est cependant à noter que deux espèces classées comme vulnérables (VU) ou potentiellement menacées (NT) demeurent présentes en août 2024 : *Pisidium tenuilineatum* (VU) et *Pisidium amnicum* (NT) dans le canton de Genève. *Physa fontinalis* (VU) a été observée dans le canton de Vaud entre 2015 et 2023 mais pas en 2024.

Perspectives de suivi et recommandations opérationnelles

A l'issue de l'analyse des données recueillies en août 2024, nous pouvons rapporter des suggestions pour les futurs suivis.

Le nombre d'individus reflète mal l'importance relative des différents taxons qui occupent le substrat. Les gastéropodes *Potamopyrgus antipodarum* et les diptères Chironomidae peuvent être très nombreux mais représentent une biomasse faible par rapport à des Dreissènes de 1 an et plus. Ainsi, à densité égale l'impact de proliférations peut être très différent entre ces espèces. S'il est possible de transformer, même grossièrement, des données de densités de petites espèces en biomasse, cette opération n'est pas possible pour les dreissènes ou des espèces qui peuvent atteindre des grandes tailles (écrevisses, bivalves Anodontes par exemple). Nous suggérons de catégoriser en abondances par grandes classes de tailles les abondances de ces espèces, ou de mesurer les individus lorsque le nombre d'individus ne dépasse pas la dizaine. Moyennant l'utilisation d'abaques, ces tailles sont transformables en biomasse avec une précision satisfaisante.

Un effort supplémentaire d'harmonisation de la méthode semble nécessaire. Le protocole utilisé en 2024 au mois d'août a permis de donner une bonne image de ce qui vit sur le fond du lac dans la partie proche littoral au prorata des densités. L'interprétation de la très faible part qui appartient aux espèces natives d'intérêt est cependant sujette à caution. Ces taxons sont rares car spatialement localisés et jamais très abondants en effectifs. Le caractère aléatoire de leur échantillonnage en donne une image tronquée, la probabilité de les observer étant sans doute assez faible en ne prélevant au minimum que 0.4 à 0.52 m² par station pour une campagne (un minimum de 8 Surbers avec un cadre de 20 x 25 ou 25 x 25 cm). Il paraît légitime de réaliser 8 prélèvements entre 0 et 1 m de profondeur au sein du canton de Vaud du fait de la diversité des habitats présents. Pour que les données soient vraiment comparables, les stations genevoises et de Thonon Agglomération devraient être prospectées avec le même effort d'échantillonnage, même si elles sont plus pauvres en habitats. Le matériel devrait aussi être harmonisé entre les opérateurs (même cadre de Surber, même vide de maille de filet), et l'entière de ce qui se trouve dans le cadre du Surber sur une épaisseur standardisée devrait être prélevé et dépouillé. Cette façon de procéder permettrait d'être plus robuste sur l'observation du déclin des insectes, qui manquent par exemple aux inventaires post-2017 à Rivaz. Une campagne d'inventaires de diversité pourrait être réalisée de manière synchrone sur une année et plusieurs stations par un échantillonnage adapté (la recherche d'un maximum de microhabitats) et par des captures d'insectes adultes. Des campagnes de piégeage lumineux ont par exemple déjà été réalisées par le canton de Vaud afin de compléter l'inventaire des trichoptères de la zone littorale. Un objectif serait de déterminer cette diversité de macroinvertébrés benthiques à l'espèce, afin de bien identifier les espèces sensibles mais également les espèces exotiques.

Sur la base des résultats obtenus et d'analyses complémentaires non illustrées, la campagne d'été est une option valide pour la réalisation d'analyses comparatives. Pour des inventaires de diversité, il y a un intérêt à réaliser des campagnes à deux saisons, du fait des cycles de développement des insectes. Les données de février (au sein du canton de Genève) permettraient par exemple de compléter les données de l'été avec 8 taxons nouveaux, contre aucun pour celles de novembre (au sein du canton de Vaud).

Une suggestion d'un indicateur à suivre serait d'évaluer la diversité des insectes hors diptères. Pour cela, deux approches simples peuvent être mobilisées. La première repose sur la richesse en genre d'insectes sensibles (Ephéméroptères, Trichoptères, Coléoptères, Lépidoptères, Odonates) qui constituent de bons indicateurs de la qualité écologique. Les analyses de Rivaz et Saint-Prex montrent clairement un déclin temporel (Figure 15). Pour des analyses historiques sur ces insectes, le niveau générique apparaît sur un plan pratique comme un niveau taxonomique suffisamment précis pour refléter des variations écologiques, tout en étant atteignable dans la plupart des suivis. Pour tenir compte de l'effort d'échantillonnage, l'abondance totale au sein de l'échantillon permet de calculer une richesse raréfiée. L'indice de Menhinick ($\text{Nombre de taxons} / \sqrt{\text{Abondance totale}}$) est par exemple une métrique qui permet d'approcher la richesse relative, indépendamment de l'effort de collecte.

Par ailleurs, l'examen des listes initiales révèle que le crustacé *Dikerogammarus haemobaphes* a été observé en 2024 sur les deux sites du canton de Vaud, aux trois profondeurs, et avec un nombre total de 55 individus. Il s'agirait de la première mention de la présence de cette espèce au sein du Léman. Il serait intéressant de voir à quel point cette espèce est déjà implantée. D'une manière générale, dans ce type de situation, une vérification des échantillons par les autres opérateurs (ici ceux du canton de Genève et de Thonon Agglomération) pourrait être demandée. Ce scénario est susceptible de se répéter car l'invasion des grands milieux par le crustacé *Chelicorophium curvispinum* s'est par exemple souvent accompagnée de celle de *C. robustum*, moins abondante. Dans les deux cas les espèces se ressemblent beaucoup et une diversité cryptique d'espèces exotiques pourrait exister au sein du Léman. Au-delà des observations macroscopiques, des investigations génétiques simples sur les récoltes d'individus de ces genres pourraient mettre en évidence cette xéno-diversité. Ce type de diversité cryptique est reconnu comme un enjeu pour la compréhension fine des processus d'invasion.

Enfin, il nous paraît important de pouvoir lier les indicateurs de diversité obtenus au potentiel d'habitats des différentes stations. La qualité et la diversité des habitats présents dans le proche littoral sont déterminantes pour le maintien de nombreuses espèces. Des descriptions de ces caractéristiques physiques seraient un plus pour compléter les interprétations biologiques et envisager des options de gestion qui permettent de préserver ce qui reste de biodiversité native en macroinvertébrés au sein du Léman.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier la CIPEL et les personnes qui ont relu avec attention une première version de ce rapport et y ont apporté à la fois des suggestions judicieuses et des éclaircissements très utiles à son amélioration.

BIBLIOGRAPHIE

- Beisel J.-N., (2021). Synthèse bibliographique. Biologie, écologie et impacts potentiels de *Dreissena rostriformis bugensis*, la moule quagga, espèce invasive au sein du Léman. Rapport pour la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman (CIPEL), 113 pages.
- Biol'Eau, (2022). Macroinvertébrés benthiques des rives genevoises du Léman
- Investigations 2021. Bernex, 34 pp.
- Bollache L (2004) *Dikerogammarus villosus* (Crustacea: Amphipoda) : another invasive species in Lake Geneva. Revue Suisse de Zoologie 111, 309–313.
- Cheng, S., Tan, S. Y., & Li, Z. (2017). Ecological interaction between submerged macrophytes and zoobenthos. J. Earth Sci. Environ. Studies, 2, 173-182.
- Devin, S., Bollache, L., Noël, P. Y., & Beisel, J. N. (2005). Patterns of biological invasions in French freshwater systems by non-indigenous macroinvertebrates. Hydrobiologia, 551, 137-146.
- Dick, J. T., Platvoet, D., & Kelly, D. W. (2002). Predatory impact of the freshwater invader *Dikerogammarus villosus* (Crustacea: Amphipoda). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 59(6), 1078-1084.
- Geist, J. A., Mancuso, J. L., Morin, M. M., Bommarito, K. P., Bovee, E. N., Wendell, D., ... & Tiegs, S. D. (2022). The New Zealand mud snail (*Potamopyrgus antipodarum*) : autecology and management of a global invader. Biological Invasions, 1-34.
- Gergs, R., & Rothhaupt, K. O. (2015). Invasive species as driving factors for the structure of benthic communities in Lake Constance, Germany. Hydrobiologia, 746, 245-254.
- Karatayev, A. Y., & Burlakova, L. E. (2025). What we know and don't know about the invasive zebra (*Dreissena polymorpha*) and quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels. Hydrobiologia, 852(5), 1029-1102.
- Kraemer, B. M., Boudet, S., Burlakova, L. E., Haltiner, L., Ibelings, B. W., Karatayev, A. Y., ... & Spaak, P. (2023). An abundant future for quagga mussels in deep European lakes. Environmental Research Letters, 18(12), 124008.
- Lods-Crozet, B., & Reymond, O. (2006). Bathymetric expansion of an invasive gammarid (*Dikerogammarus villosus*, Crustacea, Amphipoda) in Lake Geneva. Journal of Limnology, 65, 141-144.
- Lods-Crozet, B., Gerdeaux, D., & Perfetta, J. (2013). Changements des communautés biologiques littorales et piscicoles dans le Léman. Archives des Sciences, 66, 137-156.
- Lods-Crozet, B. (2020). Flux d'espèces exogènes envahissantes benthiques dans le Léman. Commission International pour la Protection des Eaux du Léman contre la pollution, Campagne, 2019, 212-221.
- Menétrey, N., Marle, P., & Lepori F. (2025). Suivi des zones littorales lacustres (Jura et Préalpes) basé sur les macroinvertébrés. Guide méthodologique. Canton de Vaud, Direction générale de l'environnement, 21 p. https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/eau/fichiers_pdf/DIREV_PRE/Document_Lac_protocole_Suivi_MZB_Littoral_2025.pdf

ANNEXES

ANNEXE 1

Liste des taxons récoltés pendant la campagne d'août 2024. Le signe « > » désigne une unité systématique inférieure à celle de la ligne précédente, c'est-à-dire une détermination plus poussée. Exo désigne dans la colonne statut le caractère exotique du taxon.

			Statut	Canton de Genève	Thonon Agglomération	Canton de Vaud
Cnidaria	Hydrozoa	Hydridae		0	0	x
Nemathelminthes	Nematoda			0	x	0
Annelida	Oligochaeta			x	x	x
	Hirudinea	<i>Helobdella</i>		0	x	0
		> <i>Helobdella stagnalis</i>		0	x	0
		<i>Erpobdella</i>		x	x	0
		> <i>Erpobdella testacea</i>		0	0	x
		<i>Piscicola geometra</i>		0	0	x
Mollusca	Gastropoda	<i>Bithynia tentaculata</i>		x	0	0
		<i>Potamopyrgus antipodarum</i>	Exo	x	x	x
		<i>Valvata piscinalis</i>		x	0	0
		<i>Ancylus fluviatilis</i>		x	x	x
		<i>Gyraulus</i>		x	0	0
		> <i>Gyraulus parvus</i>	Exo	x	0	0
		<i>Haitia acuta</i>	Exo	x	x	x
		<i>Planorbidae</i>		x	0	0
		> <i>Planorbis</i>		x	0	0
		<i>Radix</i>		0	x	0
		> <i>Radix auricularia</i>		x	x	0
		> <i>Radix balthica</i>		x	0	x
	Bivalvia	<i>Corbicula fluminea</i>	Exo	x	x	x
		<i>Dreissena</i>	Exo	0	x	0
		> <i>Dreissena polymorpha</i>	Exo	x	0	x
		> <i>Dreissena r. bugensis</i>	Exo	x	x	x
		<i>Sphaeriidae</i>		x	x	x
		> <i>Sphaerium</i> sp.		0	x	0
		> <i>Pisidium</i>		x	x	0
		>> <i>Pisidium amnicum</i>		x	0	0
		>> <i>Pisidium casertanum</i>		x	0	0
Hydracarina				x	0	0
Crustacea	Amphipoda	<i>Chelicorophium</i> sp.	Exo	0	x	0
		> <i>Chelicorophium curvispinum</i>	Exo	x	0	x
		<i>Gammaridae</i>		x	0	0
		> <i>Dikerogammarus</i>	Exo	0	x	x
		>> <i>Dikerogammarus villosus</i>	Exo	x	x	x
		>> <i>Dikerogammarus haemobaphes</i>	Exo	0	0	x
		> <i>Echinogammarus</i>		0	x	0
	Isopoda	<i>Asellus aquaticus</i>		0	0	x
Insecta	Lepidoptera	<i>Acentria ephemerella</i>		x	0	x
	Diptera	<i>Ceratopogonidae</i>		x	0	0
		<i>Chironomidae</i>		x	x	x
	Coleoptera	<i>Stenelmis</i> sp.		0	0	x
		> <i>Stenelmis canaliculata</i>		0	x	0
	Ephemeroptera	<i>Baetidae</i>		x	0	0

	Statut	Canton de Genève	Thonon Agglomération	Canton de Vaud
	> <i>Baetis rhodani</i>	x	0	0
	> <i>Cloeon dipterum</i>	x	0	0
	<i>Ephemera</i>	0	x	0
	Caenidae	x	0	0
	> <i>Caenis</i>	x	x	0
	>> <i>Caenis luctuosa</i>	x	0	0
	>> <i>Caenis macrura</i>	x	0	0
Trichoptera	Hydroptilidae	x	0	0
	> <i>Agraylea sexmaculata</i>	x	0	x
	Polycentropodidae	x	0	0
	Psychomiidae	x	0	0
	> <i>Paduniella vandeli</i>	x	0	x
	<i>Tinodes waeneri</i>	0	x	0