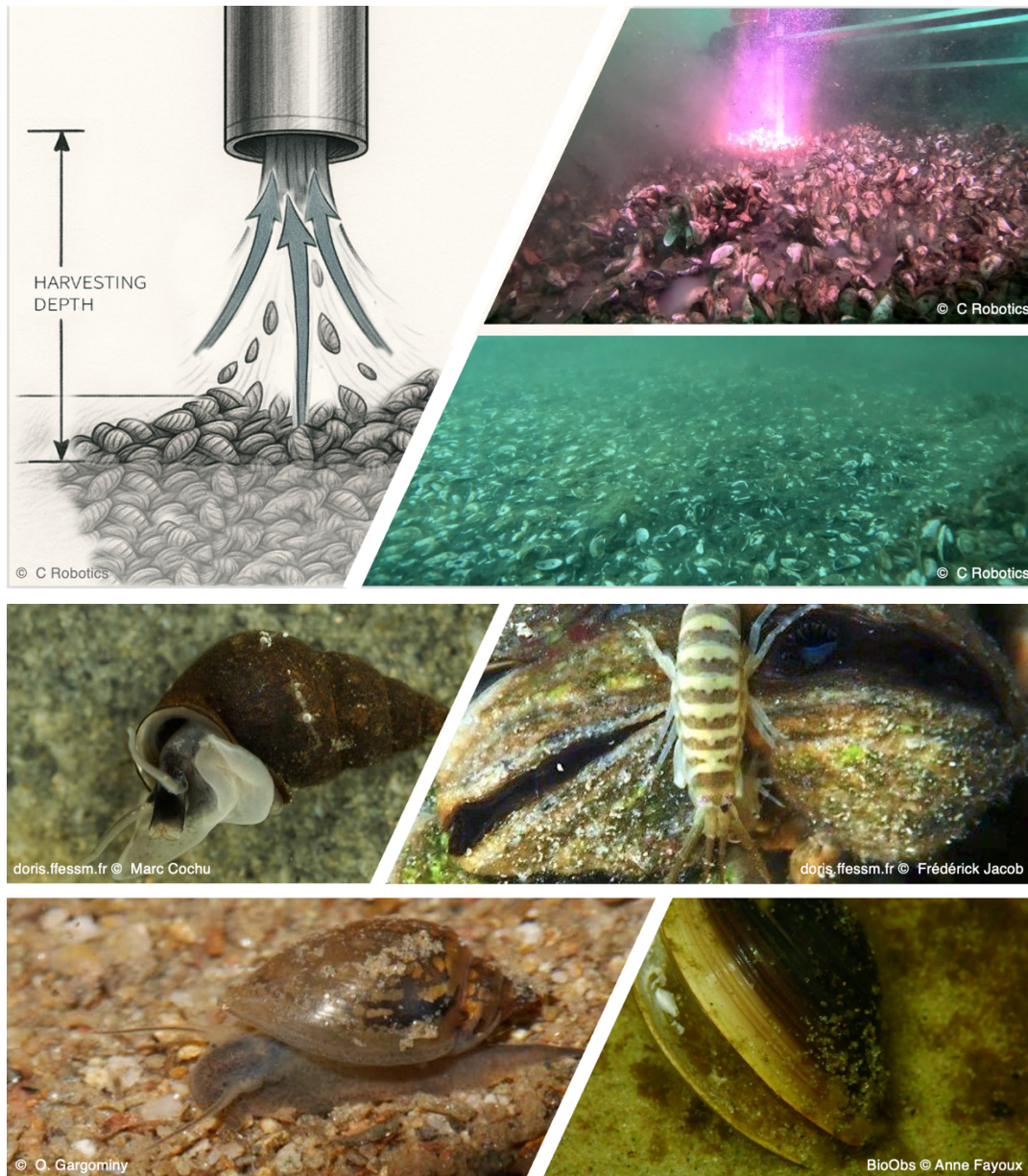


Résultats d'un test d'aspiration des moules quaggas au sein du Léman : efficacité et impact potentiel sur les autres espèces benthiques



Rapport final – Septembre 2025

Beisel Jean-Nicolas

Hydro-écologue – Spécialiste des macroinvertébrés benthiques

Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEE)

1, Cour des cigarières - CS 61039

67070 Strasbourg

Beisel, J.N. (2025). Résultats d'un test d'aspiration des moules quaggas au sein du Léman : efficacité et impact potentiel sur les autres espèces benthiques. Rapport final d'une étude conduite par ALIEN Limited, 18 pages.

Résumé

La moule quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*), observée pour la première fois dans le Léman en 2015, atteint aujourd'hui des densités et des biomasses très élevées, provoquant des impacts majeurs sur les habitats et les communautés benthiques. Face à cette prolifération, un test de retrait mécanique par aspiration a été conduit en 2025 par la société ALIEN Limited sur deux sites (Thonon-les-Bains, France et Hermance, Suisse) à 20 m de profondeur. L'efficacité du dispositif et son impact sur les autres espèces de macroinvertébrés ont été évalués par comparaison de trois types d'échantillons : des prélèvements témoins réalisés par des plongeurs scientifiques, des échantillons de surfaces aspirées par le dispositif et l'examen de ce qui reste en place après aspiration.

Les prélèvements des plongeurs scientifiques révèlent une biomasse de quaggas vivantes extrêmement élevée sur les sites de test, comprise entre 5,6 et 6,2 kg/m². L'aspiration, en retirant une couche plus épaisse, porte à près de 10 kg/m² la biomasse vivante extraite. L'ensemble du spectre de tailles de quagga est retiré et la somme des quantités extraites d'animaux vivants et de débris de coquilles atteint 20 kg/m². L'intervention retire *in fine*, selon les sites, 90 à 98 % des densités en place. La faune non-cible était peu abondante, avec de 400 à 1700 ind./m², et représentée par 11 taxons dominés par quatre espèces invasives : les gastéropodes *Potamopyrgus antipodarum* et *Physella (Haitia) acuta*, le crustacé *Dikerogammarus villosus* et le bivalve *Corbicula fluminea*. Ces quatre espèces représentaient au moins 93 % des macroinvertébrés hors dreissènes. La faune native est donc relictuelle avec 7 autres taxons dont la somme des densités ne dépasse pas 50 ind./m². Dans ce contexte avec de très faibles densités d'espèces hors dreissènes dominées par une écrasante majorité de taxons exotiques, l'impact collatéral de l'aspiration apparaît limité.

Le procédé testé se montre performant pour extraire les quaggas sans dommages recensés aux organismes autochtones, très peu représentés. Les zones nettoyées constituent des habitats libérés dont l'évolution mériterait un suivi afin d'évaluer la recolonisation par la biodiversité indigène ou, au contraire, le retour en masse de la quagga.

Abstract

The quagga mussel (*Dreissena rostriformis bugensis*), first recorded in Lake Geneva in 2015, now reaches very high densities and biomass, causing major impacts on benthic habitats and communities. To address this proliferation, a mechanical suction-removal test was conducted in 2025 by ALIEN Limited at two sites (Thonon-les-Bains, France, and Hermance, Switzerland) at 20 m depth. Removal efficiency and impacts on non-target macroinvertebrates were evaluated by comparing three sample types: control quadrats collected by scientific divers, quadrats suctioned by the device, and the residual material remaining in situ after suction.

Diver-collected samples revealed extremely high biomass of live quagga mussels at the test sites, ranging from 5.6 to 6.2 kg/m². Suction, by removing a thicker layer, raised the extracted live biomass to nearly 10 kg/m². The full-size spectrum of quagga mussels was removed, and the combined mass of live animals and shell debris extracted reached 20 kg/m². Ultimately, depending on the site, the intervention removed 90–98% of the standing densities. Non-target fauna was scarce, ranging from 400 to 1,700 ind./m², and consisted of 11 taxa dominated by four invasive species: the gastropods *Potamopyrgus antipodarum* and *Physella (Haitia) acuta*, the crustacean *Dikerogammarus villosus*, and the bivalve *Corbicula fluminea*. These four species accounted for at least 93% of the non-dreissenid macroinvertebrates. Native fauna was therefore relictual, comprising seven other taxa whose combined densities did not exceed 50 ind./m². In this context - very low densities of species other than dreissenids and an overwhelming majority of exotics - the collateral impact of suction appears limited.

The tested procedure proved effective for removing quagga mussels without recorded harm to the few native organisms present. The cleared areas represent released habitats whose trajectories warrant monitoring to assess whether they are recolonized by indigenous biodiversity or, conversely, rapidly reinfested by quagga mussels.

Introduction

La moule quagga est une espèce exotique envahissante qui a été observée pour la première fois dans le Léman en 2015 (Lods-Crozet, 2020). Depuis lors, elle s'est développée en atteignant des densités qui atteignent localement plusieurs milliers d'individus au m² ce qui représente plusieurs kg de biomasse (Lods-Crozet & Chevalley, 2018 ; Beisel *et al.*, 2023). Le recouvrement surfacique du Léman, comme sur d'autres lacs profonds, augmente au fil du temps avec une colonisation progressive des plus grandes profondeurs (Beisel, 2021 ; Haltiner *et al.*, 2022 ; Kraemer *et al.*, 2023).

Si la dynamique de population de la quagga dans le Léman suit celle observée dans les grands lacs nord-américains entre 1990 et les années 2020, et qu'aucun élément ne vient la contraindre, des modèles prédisent qu'elle pourrait augmenter d'un facteur 9 à 22 en termes de densité et biomasse d'ici à 2045 (Kraemer *et al.*, 2023). Les impacts écologiques, sanitaires et économiques déjà observés d'une telle prolifération sont alarmants. Sur un plan écologique, la quagga engendre des conséquences sur le milieu et ses biocénoses via l'activité de filtration (pour respirer et se nourrir) et la modification des habitats par un développement en grappes, avec des coquilles qui immobilisent des éléments essentiels et changent la structure des fonds (synthèse dans Beisel, 2021). Les impacts peuvent aussi relever du volet sanitaire car les conditions créées par la présence des quaggas peuvent favoriser des efflorescences de cyanobactéries toxiques plus fréquentes (Vanderploeg *et al.*, 2013) et les moules peuvent elles-mêmes héberger des pathogènes. Ainsi, les dreissènes favoriseraient la bioamplification dans les chaînes trophiques des concentrations de *Clostridium botulinum* (bactérie responsable du botulisme) au point d'avoir engendrer des mortalités massives d'oiseaux et de poissons aux Etats-Unis (Pérez-Fuentetaja *et al.*, 2014). Sur un plan économique, la présence des dreissènes entraîne des coûts directs et indirects par une baisse d'efficacité d'un process industriel, par la diminution d'une ressource naturelle, par un besoin d'entretien de structures, un vieillissement accéléré de matériaux ou encore par la nécessité de traiter de l'eau en contact avec des dreissènes pour diminuer un risque sanitaire (Beisel, 2021). Les données sont très lacunaires et biaisées géographiquement sur l'Amérique du Nord, mais en 2005 le coût estimé des dreissènes s'élevait à 1 milliard de dollars par an sur ce continent (Pimentel *et al.*, 2005). Une synthèse récente porte à près de 50 milliards de dollars les coûts liés aux dreissènes entre 1980 et 2020 aux Etats-Unis (Haubrock *et al.*, 2021). Dans cette étude récente, les coûts de gestion sont globalement dix fois moins importants que ceux liés aux impacts.

Face à ces impacts et menaces sur l'environnement, les usages et la santé, des actions locales peuvent être envisagées mais elles nécessitent d'être testées. Le retrait mécanique des moules est une option techniquement envisageable. Le présent rapport présente le résultat d'un test d'application organisé par la société *ALIEN Limited* (CEO : Carole Fonty) d'un procédé d'aspiration conçu par une société norvégienne. Pour cet essai, un scaphandrier utilise l'appareil sur des zones de test à 20 m de profondeur, en balayant la surface de quadrats selon un protocole défini. Ce qui est aspiré est récupéré pour être analysé dans le détail et comparé à ce qui peut être observé sur le fond. L'objectif du test était double : (i) éprouver l'efficacité du procédé, (ii) évaluer son impact sur les organismes non cibles. Les moules sont fixées mais avec des forces d'attachement faibles en zone profonde. Il est attendu du procédé qu'il retire efficacement du fond les quaggas sans tri des tailles et y compris lorsqu'elles se présentent en grappes. Le fond du lac, colonisé ou pas, est aussi un habitat pour le compartiment des macroinvertébrés benthiques comme des mollusques bivalves et gastéropodes, des oligochètes, des sangsues, des crustacés, des insectes. L'état de ce qu'il reste de cette faune une fois la quagga massivement installée n'étant pas connu, le test vise aussi à évaluer la diversité des organismes benthiques au sein des quaggas et dans quelle mesure cette faune est, elle aussi, aspirée par le dispositif.

Matériel et méthode

Sites d'étude et dates d'intervention

Deux stations ont fait l'objet d'un test d'aspiration : Thonon-les-Bains (F) et Hermance (CH). Les deux sites choisis sont localisés à 20 m de profondeur dans une zone où la pente du substrat est estimée à 15°. Des plongeurs scientifiques ont pu repérer le site juste avant le test et valider sa représentativité par rapport à une zone plus vaste. Les surfaces de recouvrement en quaggas étaient de 75 à 80 % sur la zone d'étude. Les plongeurs ont choisi au hasard la position des quadrats tant pour les prélèvements témoins de ce qui vit sur le fond que pour les zones destinées au test d'aspiration.

L'expérimentation s'est déroulée le 30 juin 2025 à Thonon-les-Bains et le 1 juillet à Hermance.

Description du dispositif

L'appareil utilisé, appelé C-Disc a été conçu et fabriqué par une société norvégienne qui possède une solide expérience de ce type d'engins pour un usage en milieux littoraux marins. Le concepteur du dispositif est présent lors du test pour donner les consignes d'utilisation, assurer le bon fonctionnement et le calibrage de la puissance du dispositif, recueillir à chaud le retour d'expérience de son utilisation sur un fond lacustre.

Le C-Disc est un outil d'aspiration mobile utilisé par des plongeurs sous-marins pour récolter diverses espèces cibles (comme des oursins ou des coquillages) sur les fonds marins. Il a été initialement conçu pour optimiser le temps de plongée et augmenter le taux de capture par rapport à la méthode traditionnelle de ramassage à la main tout en limitant les prises accidentelles.

Une pompe hydraulique est déployée sur le bateau pour créer une aspiration d'environ 500 litres par minute à 6 bars de pression. L'aspiration de l'eau et des moules est alors créée par la dépression qui est produite au niveau de l'unité C-Disc grâce à un système de type venturi (Figure 1). Un tuyau fixé au module C-Disc permet au scaphandrier d'utiliser une buse d'aspiration et ainsi d'aspirer sans trop d'effort les espèces ciblées. Le module C-Disc pèse environ 40kg dans l'air et 4kg dans l'eau.

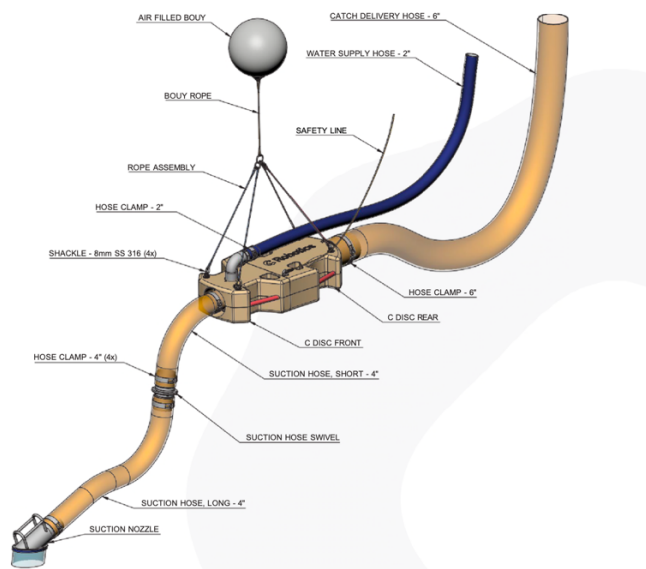


Figure 1 : Schéma conceptuel du fonctionnement du C-Disc (Source : C-Robotics).

L'opérateur, un scaphandrier, manipule à quelques centimètres au-dessus du fond le tuyau flexible et sa buse d'aspiration d'un diamètre de 4 pouces (10,16 cm). La distance entre la buse et ce qui doit être aspiré ainsi que la puissance d'aspiration modulée par la pompe sont les deux paramètres qui régissent la capacité du dispositif à faire remonter les tapis de quaggas. Dans le cadre du test, ce qui est aspiré par la buse est déplacé à travers le tuyau flexible et aboutit dans un filet. La taille, la position et le vide de maille de ce filet permettent de faire un tri grossier de ce qui est aspiré en rejetant au milieu les particules les plus fines et en récupérant le reste.

Protocole de test du dispositif

Lors de l'essai, sur chaque site, la matinée a été consacrée à la prise en main, aux essais techniques et au calibrage du dispositif tandis que l'après-midi était consacrée aux tests d'aspiration des tapis de quaggas.

Les premiers essais visaient à optimiser la distance entre la buse et le substrat (tests à 2, 5 ou 10 cm) ainsi que la vitesse de déplacement de la buse (lente ou modérée) afin de déterminer les conditions d'aspiration les plus efficaces pour récolter les moules sans aspirer trop de sédiments. Puis, un test d'immobilisation de la buse d'aspiration au-dessus du sédiment pendant 5, 10 ou 30 secondes a permis d'estimer si la profondeur de sédiments aspirés dépend fortement de ce paramètre.

Protocole de récupération des échantillons

Pour répondre aux objectifs écologiques de l'essai, trois types d'échantillons ont été recueillis et comparés, à chaque fois en triplicats.

Le premier type d'échantillons correspond à trois quadrats de 50 cm de côté posés au hasard sur le fond à une profondeur de 20 m par les plongeurs scientifiques. L'opérateur du dispositif testé (un scaphandrier) avait pour consigne d'aspirer en un seul passage de la buse d'aspiration la surface d'un quadrat. Le cône d'aspiration hydraulique étant relativement étroit, la surface aspirée se trouve par conséquent à l'aplomb de la buse d'aspiration sans risque de perturbation des surfaces adjacentes. Il en résulte que la manipulation du dispositif permet d'être précis sur les surfaces aspirées et que le passage sur un quadrat fournit une image quantitative fiable. L'opération est très rapide une fois le dispositif et les opérateurs en place. La récupération de ce matériel (ce qui est aspiré au sein des trois quadrats) constitue donc un type d'échantillons.

La récolte d'un autre type d'échantillons a consisté à demander aux plongeurs scientifiques d'échantillonner trois quadrats de 50 cm de côté sur un espace voisin de celui du test d'aspiration. Il s'agit en quelque sorte d'un témoin de ce qui se trouve sur le fond et qui permet d'avoir une comparaison avec ce qui est aspiré. Pour cela, les plongeurs ont prélevé à l'aide d'une pelle tout ce qui se trouvait au sein des quadrats sur une épaisseur de quelques centimètres. La couche la plus biogène est généralement considérée comme étant celle de surface pour des raisons d'oxygénation du milieu. La consigne était d'essayer d'obtenir les 4 à 5 cm superficiels.

Le troisième type d'échantillons a consisté à revenir sur les quadrats aspirés pour échantillonner au-delà de ce qui a été décapé et investigué ce qu'il reste après utilisation du dispositif. Ces échantillons, réalisés également avec une pelle sur quelques centimètres de profondeur, sont donc localisés aux mêmes endroits que les quadrats aspirés.

Lors de la campagne réalisée à Thonon-les-Bains, la météo a brusquement changé en milieu d'après-midi avec des vents très forts alors que le scaphandrier était en train d'opérer sur le fond. Contraint par des courants, il avait du mal à se maintenir stable sur la zone d'étude. Pour des raisons de sécurité, le responsable de la plongée a stoppé l'opération alors que deux quadrats sur 3 avaient été aspirés. Nous disposons donc pour le site de Thonon-les-Bains des 3 quadrats témoins réalisés sur le fond par les plongeurs scientifiques, 2 quadrats aspirés avec le dispositif,

2 échantillons de la surface décapée après aspiration. Pour Hermance, les conditions de sécurité étaient réunies et le plan complet d'échantillonnage a pu être réalisé avec 3 échantillons de chaque type.

Les échantillons ont été conditionnés rapidement après avoir été prélevés et conservés dans des congélateurs industriels.

Protocole de dépouillement des échantillons

Le protocole de dépouillement est le même pour chaque échantillon. Il a été imaginé pour répondre aux objectifs de quantifier les quaggas (masse, dénombrement et spectre de tailles) et identifier et dénombrer les autres macroinvertébrés benthiques.

Chaque échantillon a ainsi été traité par étapes successives. Il est d'abord pesé, puis décongelé et rincé. Lors du conditionnement les échantillons ont été mis en sacs après passage sur un tamis avec un vide de maille de 500 μm et ils contiennent par conséquent très peu d'eau. Une première fraction de 100 g (en poids humide, c'est-à-dire égoutté) est extraite pour être triée sous loupe binoculaire (grossissement $\times 10$). Les coquilles de mollusques entières (qui étaient vivantes au moment du prélèvement) sont toutes extraites du sous-échantillon de 100 g (Figure 2). Lorsque les quaggas sont encore en agrégats, le nombre de moules sur ceux-ci est compté et l'agrégat est pesé. Les invertébrés benthiques qui ne sont pas des quaggas sont mis de côté pour être déterminés ultérieurement. A l'issue de ce tri, la fraction de quaggas entières est pesée, ainsi que la fraction de coquilles cassées. Cette opération a été répétée trois fois sur chaque prélèvement, ce qui représente donc 300 g examinés dans le détail. Sur tout le reste du prélèvement, les invertébrés non quagga sont triés sous loupe avec un grossissement $\times 2$. Les valeurs de densités et de biomasse des quaggas sont donc extrapolées à partir des comptages et mesures sur les trois échantillons de 100 g. Les densités des autres macroinvertébrés benthiques sont des observations exhaustives de l'ensemble d'un échantillon de 0,25 m² (carré de 50 cm de côté).

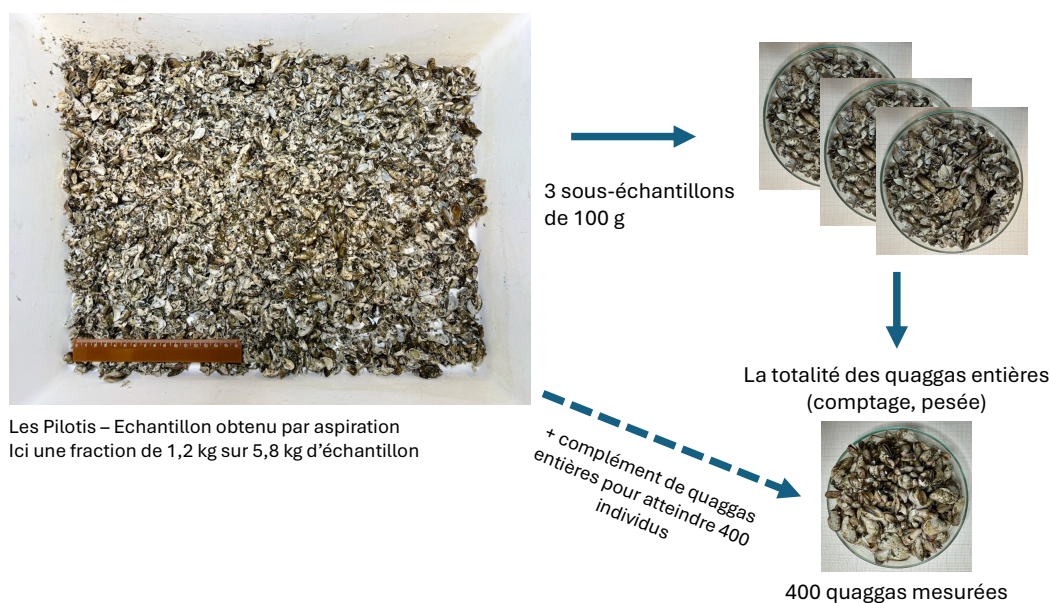


Figure 2 : Procédure de dépouillement de quaggas au sein des échantillons, ici une fraction de ce qui est obtenu par aspiration à Hermance. Sur l'ensemble des échantillons, nous n'avons obtenu que 2 fois le minimum de 400 individus à mesurer pour l'analyse de la distribution des tailles à partir des 3 sous-échantillons de 100 g. Le lot d'individus mesurés a alors été complété en prenant au hasard des individus dans l'échantillon complet. Les autres macroinvertébrés étaient tous extraits de l'ensemble du prélèvement.

Lors du dépouillement des trois fractions de 100 g, les individus entiers de quaggas sont mis de côté pour être mesurés. L'objectif pour analyser le spectre de taille de la population était d'avoir 400 mesures. Si le tri des trois fractions permettait d'obtenir plus de 400 individus, les 400 premiers individus pris au hasard étaient mesurés à 0,1 mm près avec un pied à coulisse numérique. Dans le cas contraire, des quaggas supplémentaires sont extraites sous loupe binoculaire du reste de l'échantillon jusqu'à en obtenir 400 (Figure 2). L'usage d'une loupe binoculaire assure de trier y compris des petits individus de quelques mm et de percevoir immédiatement s'il s'agit d'une coquille d'un individu qui était mort ou vivant au moment du prélèvement.

Les macroinvertébrés non quagga ont été déterminés et comptés en utilisant l'ouvrage de Tachet *et al.* dans son édition revue et augmentée de 2010.

Le spectre de taille des 400 quaggas mesurées par site est analysé par décomposition polymodale selon la méthode de Bhattacharya (1967). Pour cela, nous utilisons un outil d'analyse développé en interne et déjà éprouvé pour réaliser une analyse populationnelle de la quagga dans la rivière Moselle (Trunfio *et al.*, 2023).

La totalité des dépouillements a été réalisée par Jean-Nicolas Beisel et Cybill Staentzel, hydro-écologues et spécialistes de macroinvertébrés benthiques.

Résultats

Conditions d'aspiration les plus efficaces

Les premiers essais avec le dispositif ont permis de montrer que la distance entre la buse et le sédiment gagne à être réduite. A 10 cm, l'aspiration était vraisemblablement trop faible, avec une épaisseur décapée qui variait entre 2 et 11 cm. L'efficacité d'aspiration était quasiment la même entre 2 et 5 cm de distance sur le site de Thonon-les Bains. A Hermance, où l'épaisseur de la couche de sédiments coquillés était plus épaisse, le procédé s'est avéré plus efficace en laissant la buse à 2 cm du substrat. Pour cette même raison, la vitesse lente de balayage de la zone a été préférée à une vitesse plus élevée. Il faut tout simplement laisser le temps au dispositif d'aspirer les couches successives qui constituent le matelas de moules qui tapisse le fond sur une épaisseur importante. La mise en place d'un quadrat de 1 m² et son aspiration durait 3 à 4 mn. Enfin, le test d'immobilisation de la buse d'aspiration au-dessus du sédiment pendant 5, 10 ou 30 secondes n'a pas révélé de différences de profondeur de sédiments prélevés (16 à 18 cm selon le site test). Il n'y a donc pas de conséquences à rester trop longtemps sur place avec la buse et dès 5 secondes on a atteint la profondeur maximale de ce qui est décapé dans les conditions du test (buse à hauteur fixe au-dessus de la ligne initiale du sédiment).

Dépouillement des dreissènes

Les dreissènes récoltées au cours de ces expérimentations sont quasi exclusivement des quaggas. Nous avons rencontré quelques rares individus de *Dreissena polymorpha* (moule zébrée - zebra), à hauteur, au maximum, de 1 individu zebra pour 1000 individus quagga. Les zebra observées avaient toutes une taille comprise entre 10 et 17 mm. Dans les résultats ci-après, les dreissènes prises en compte sont des quaggas qui étaient en place au moment de l'expérimentation.

Par contre, les coquilles récoltées au sein des échantillons pouvaient appartenir à des quaggas ou des zebras sans qu'il soit possible de faire une quantification entre les deux, du fait d'une fragmentation souvent importante. Il est à noter qu'à ce jour, on ne sait rien sur la durée de vie d'une coquille de zebra ou de quagga et que les coquilles peuvent avoir dérivé avec des mouvements d'eau. Sur la base de l'examen des coquilles entières et déterminables, les coquilles de quagga étaient très majoritaires.

Masse et densité de quaggas sur le fond du lac au niveau des sites étudiés

La biomasse de quaggas observées sur le fond est très élevée et très peu variable : entre 5,57 et 6,21 kg de quaggas par m² (Figure 3). Les deux zones d'étude étaient donc très homogènes et très comparables entre elles de ce point de vue. Par contre, la densité de quaggas était sensiblement différente à Thonon-les-Bains et Hermance : entre 12200 et 16100 ind./m² (moyenne à 14342) et entre 7300 et 12400 ind./m² (moyenne à 8528), respectivement.

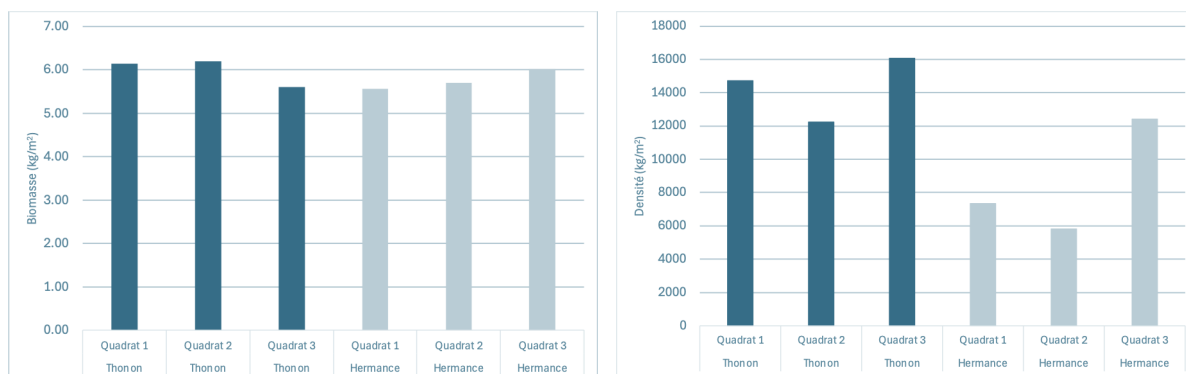


Figure 3 : Masse (poids frais en kg par m²) et densité (ind./m²) de moules quagga récoltées par les plongeurs scientifiques au sein de trois quadrats témoins sur les deux sites d'étude (Thonon-les-Bains à gauche, Hermance à droite).

Les structures de tailles des populations de quaggas sont très différentes à Thonon-les-Bains et Hermance (Figure 4). A Thonon-les-Bains, la taille médiane est de 12,8 mm avec des valeurs comprises entre 1,2 et 29,2 mm. Une cohorte de petits individus d'une taille moyenne de 4,9 mm s'individualise du gros de la population qui mesure en moyenne 13,5 mm. Cette cohorte correspond probablement à un événement de reproduction récent qui se différencie des précédents par un décalage dans le temps. L'étalement de la cohorte principale laisse penser que deux cohortes d'individus plus âgés se superposent, correspondants là aussi à des événements de reproduction distincts dans le temps mais avec une croissance d'individus qui se rattrapent en termes de taille après quelques mois de croissance. Il y aurait donc trois cohortes à Thonon-les-Bains : des petits (jeunes) individus distincts d'individus de taille moyenne qui représentent l'essentiel de la population et une troisième cohorte, très logiquement beaucoup moins importante en densité, d'individus plus grands (plus âgés, moyenne de 20,2 mm).

A Hermance, la taille médiane est de 15,3 mm. Deux cohortes se distinguent seulement car on n'observe pas d'individus inférieurs à 5 mm. L'essentiel des individus est représenté par une cohorte de taille moyenne de 13,1 mm, très comparable à celle des individus de taille moyenne de Thonon-les-Bains. L'autre cohorte est composée d'individus, assez nombreux, de grandes tailles (en moyenne 23,6 mm) et donc plus âgés.

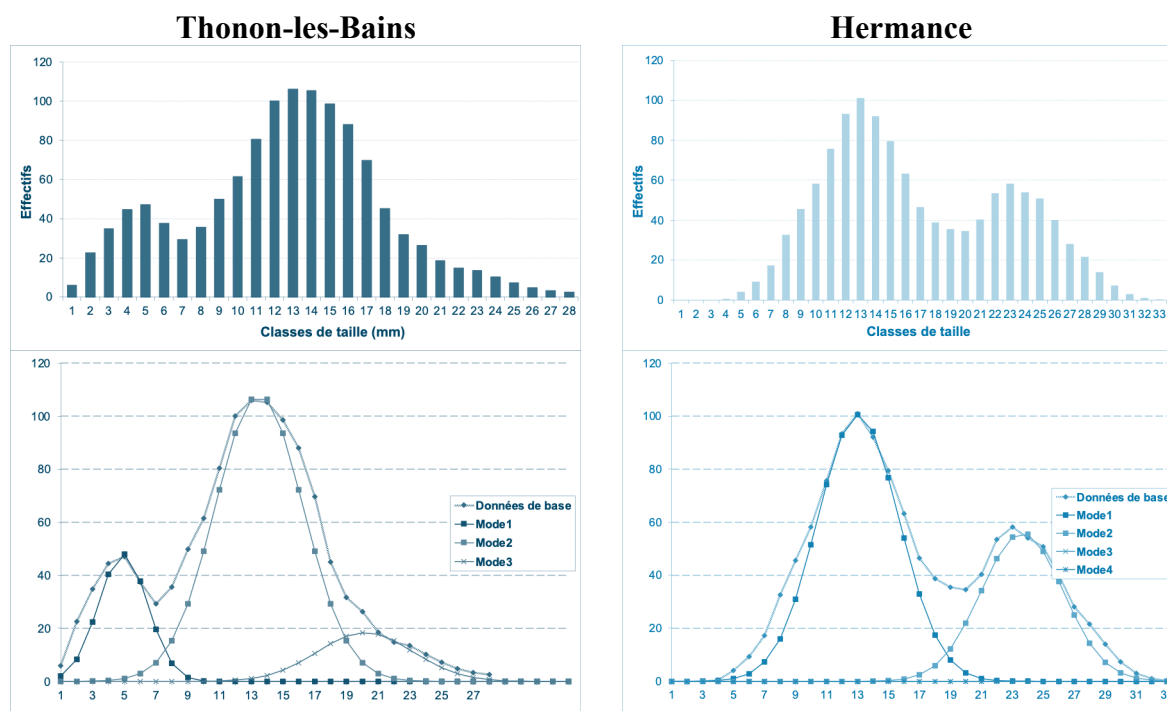


Figure 4 : Distribution de fréquence des tailles de la somme des trois lots de 400 quaggas prises au hasard au sein des échantillons témoins récoltés par les plongeurs. Données lissées (haut) et décomposition polymodale (bas).

Il y a donc 1,7 fois plus de quaggas à Thonon-les Bains qu'à Hermance mais pour une biomasse comparable car les structures de tailles sont assez différentes. Une cohorte de jeunes individus présente uniquement à Thonon-les Bains, compense le poids d'une cohorte de grands individus plus massivement présents à Hermance.

Efficacité de l'aspiration vis-à-vis de la quagga

Si l'on compare les densités sur le fond avec le nombre d'individus aspirés au sein d'un quadrat, on observe 3,1 fois plus de quaggas aspirés à Thonon-les-Bains et 2,6 fois plus à Hermance (Figure 5). Ces différences fortes sont liées à une différence d'épaisseur de la couche prélevée par les plongeurs scientifiques dans les zones témoins par rapport à ce qui est aspiré par le C-disc. Les plongeurs ont raclé au sein du quadrat la couche superficielle sur quelques centimètres et ont ainsi récoltés, au sein des 0,25 m² des zones témoins, une masse allant de 1,75 kg de matériel à 5,7 (moyenne à 3,1 kg). L'examen des vidéos prise par les caméras embarquées sur le dispositif d'aspiration et par les plongeurs révèle que la couche aspirée est bien plus profonde. Cela est confirmé par le poids minimum de ce qui est récupéré par aspiration : 4,7 kg de matière au moins par quadrat (en moyenne 6,3 kg avec un maximum à 8,4). Les échantillons obtenus par aspiration sont par ailleurs moins chargés en particules fines que ceux des zones témoins, du fait de la récupération de l'aspiration dans un filet à maille fine mais qui permet, compte tenu du flux d'eau aspiré, de relarguer au milieu l'essentiel des particules fines.

Finalement, ce résultat révèle, et c'est remarquable, que l'épaisseur de moules vivantes au moment du prélèvement est supérieure à ce qui est observé à partir des prélèvements pris sur les zones témoins par les plongeurs scientifiques. Si l'on considère les résultats issus de

l'aspiration, la biomasse moyenne à Thonon-les-Bains était de 9,8 kg/m² et de 10,13 kg/m² à Hermance, soit de 1,6 à 1,7 fois plus que ce qui a été observé par les plongeurs.

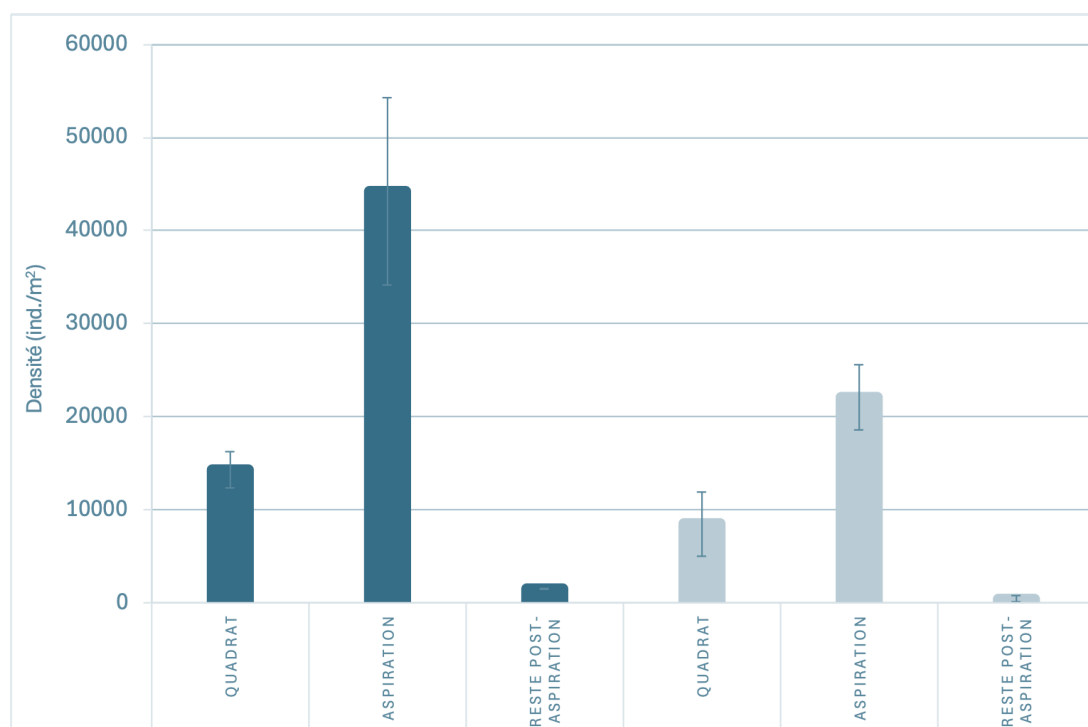


Figure 5 : Nombre moyen (+/- écart-type) de moules quaggas récoltées par les plongeurs au sein des trois catégories d'échantillons (quadrats réalisés par les plongeurs sur une zone témoin, quadrats aspirés, prélèvements post-aspiration par les plongeurs) sur les deux sites d'étude (en nombre d'individus par m²). Le calcul est réalisé sur trois triplicats pour chaque type sauf à Thonon-les-Bains où deux aspirations ont été réalisées avec deux échantillons post-aspiration par conséquent.

Les tailles médianes des individus aspirés Thonon-les-Bains étaient de 10,9 mm, soit 2 mm de moins que les échantillons de quadrats témoins. A Hermance, la taille médiane des individus aspirés était de 15,5 mm, soit une valeur très proche de celle des quadrats témoins (15,2 mm), mais avec moins de très grands individus.

L'examen du spectre de taille des individus aspirés révèle que tout le spectre de taille est aspiré par le dispositif, en proportions cohérentes avec ce qui observé sur le fond (Figure 6). Les petites différences observées peuvent s'expliquer par une répartition hétérogène des tailles selon la profondeur d'échantillonnage. Il serait cependant spéculatif et hasardeux de proposer un patron de distribution verticale des tailles avec seulement nos données et qui n'ont pas été acquises pour cela.

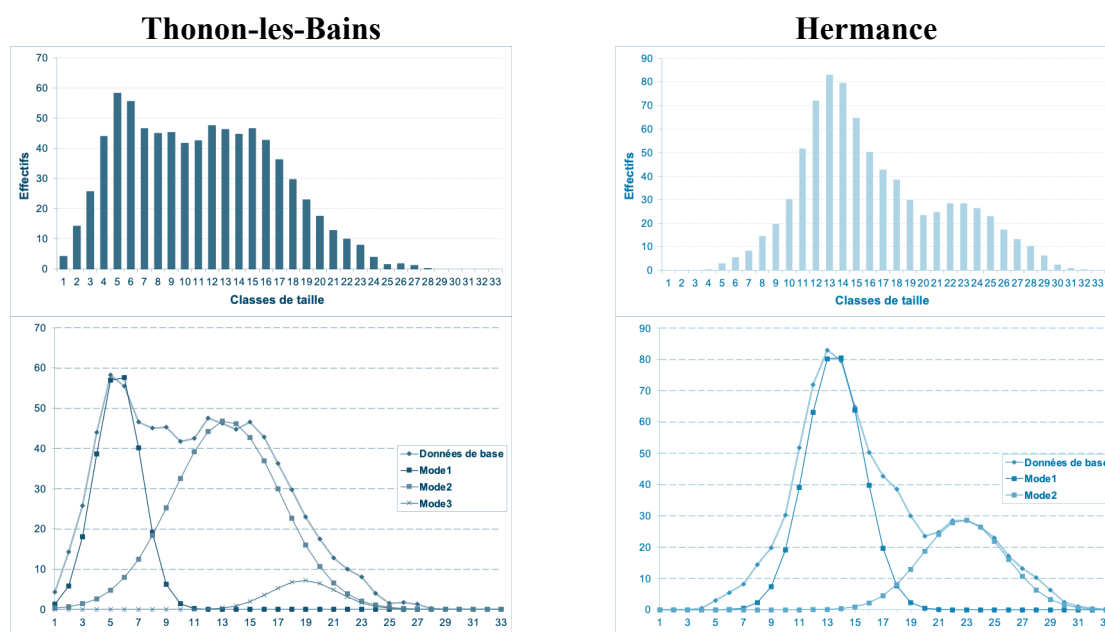


Figure 6 : Distribution de fréquence des tailles de quaggas prises au hasard au sein des échantillons obtenus par aspiration. Nous disposons de deux répliquats (800 individus) à Thonon-les-Bains et trois répliquats (1200 individus) à Hermance. Données lissées (haut) et décomposition polymodale (bas).

Un dernier élément pour évaluer l'aspiration consiste à examiner ce qui reste sur place après aspiration. Ces échantillons étaient majoritairement composés de vases et de coquilles cassées. A Thonon-les-Bains, il reste en moyenne 1500 ind./m² en place après aspiration. C'est 9,5 fois moins que ce qui a été observé dans les échantillons témoins prélevés sur quelques centimètres de surface (14300 ind./m² observés) mais c'est 30 fois moins que ce qui est obtenu par aspiration sur une épaisseur environ trois fois plus importante de sédiments (44200 ind./m²). Il faut relever également que les prélèvements post-aspiration à Thonon-les-Bains étaient particulièrement volumineux du fait d'une profondeur d'échantillonnage importante. L'examen du spectre de taille montre un resserrement des individus laissés sur place autour de la valeur médiane : après l'aspiration, il y a moins de petits ou de grands individus que dans les échantillons témoins ou aspirés (Figure 7).

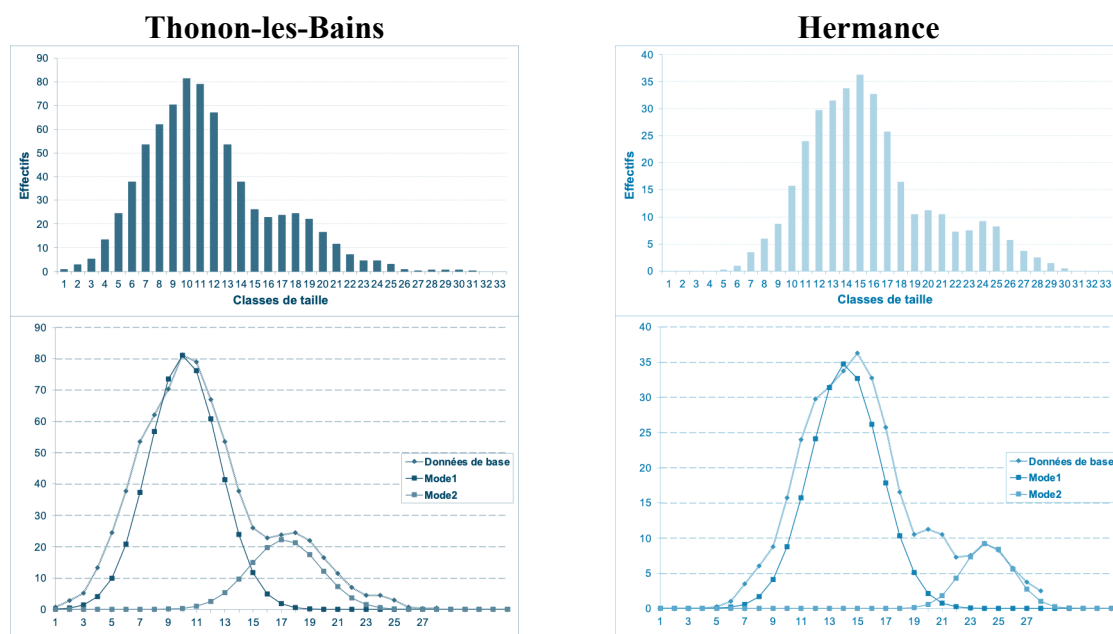


Figure 7 : Distribution de fréquence des tailles de quaggas prises au hasard au sein des échantillons obtenus sur le sédiment prélevé après aspiration, composé surtout de vase et de coquilles. Nous disposons de deux répliquats (800 individus) à Thonon-les-Bains et trois répliquats (1200 individus) à Hermance. Données lissées (haut) et décomposition polymodale (bas).

A Hermance, il reste en moyenne 459 ind./m² après aspiration, à comparer avec la moyenne de 8528 ind./m² observée en zone témoin par les plongeurs (18,6 fois moins) et la moyenne des 22119 ind./m² retirés par aspiration (48 fois moins).

Un fond très riche en coquilles

Un retour de l'expérience menée porte sur la masse de coquilles de dreissènes observées sur le fond (Figure 8). A Thonon-les-Bains et à Hermance, la couche superficielle du fond du lac (échantillons récupérés sur les zones témoins par les plongeurs) comprend une masse de coquilles qui approche très grossièrement celle de moules vivantes : 4,6 et 7,9 kg/m² respectivement. A Thonon-les-Bains, la masse de coquilles représente en moyenne 42 % en masse de la couche superficielle (quadrats témoins des plongeurs), 61 % au sein de ce qui est aspiré (couche plus épaisse, 17,9 kg/m²), 85 % au sein de ce qui reste après aspiration. Ces dernières valeurs sont sans doute surestimées car une part de la fraction fine n'a pas été récupérée et a été rejetée au milieu, augmentant artificiellement la part des coquilles au sein d'un échantillon. Ils illustrent cependant que le fond du lac est à cet endroit un millefeuille de coquilles en décomposition et de vase. Des carottages permettraient d'investiguer cela plus rigoureusement mais ce n'était pas l'objet de l'étude produite ici. A Hermance, la part de coquilles passe de 47 % de l'échantillon de surface, à 52 % de ce qui est aspiré (couche plus épaisse, 12,1 kg/m²) et 84 % de ce qui reste après aspiration. Les coquilles en décomposition y sont donc également très nombreuses mais en moindre importance qu'à Thonon-les-Bains.

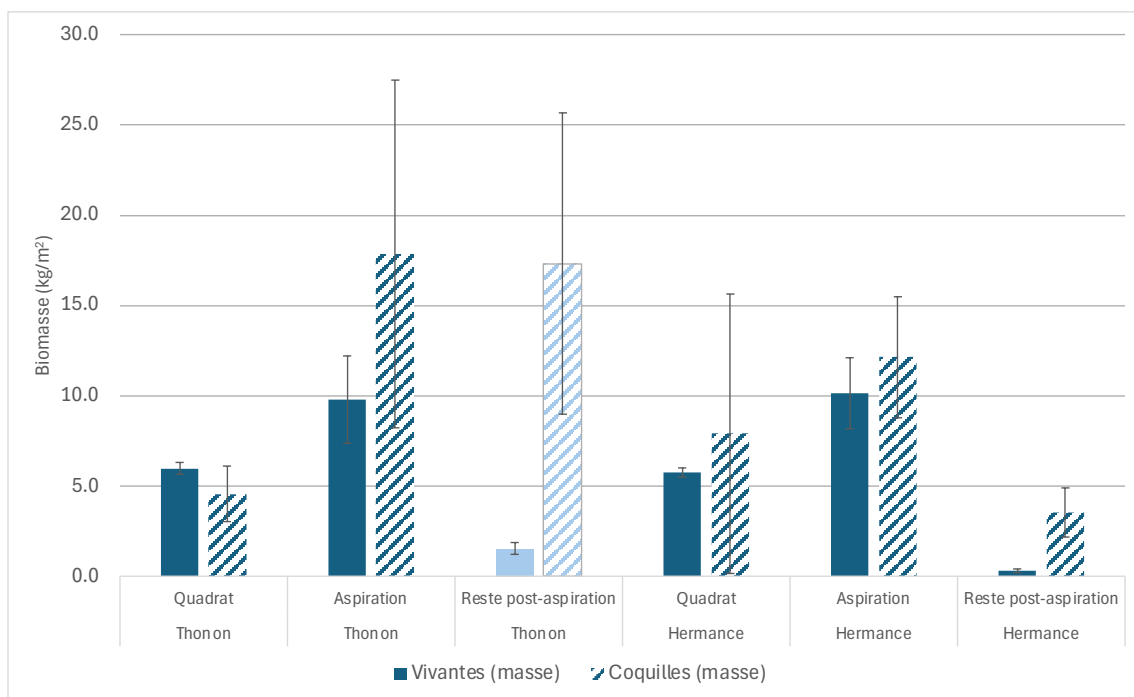


Figure 8 : Biomasse (+/- écart-type) de moules quaggas entières et de coquilles de dreissènes au sein des trois catégories d'échantillons (quadrats réalisés par les plongeurs sur une zone témoin, quadrats aspirés, prélèvements post-aspiration par les plongeurs) sur les deux sites d'étude (en kg par m²). Les données présentées pour le prélèvement post-aspiration à Thonon-les Bains (couleurs claires) sont à considérer avec précaution car les échantillons étaient plus importants en volume qu'à Hermance (plus grande profondeur de prélèvement).

Un impact faible sur la très rare faune observée avec les quaggas

Les autres invertébrés benthiques observés au sein des zones d'étude étaient très peu diversifiés et très peu nombreux (Tableau 1). Hors Dreissènes, nous n'avons récolté que 11 taxons différents sur l'ensemble des prélèvements, ce qui est très faible pour l'effort de capture réalisé (un total de 63 kg de sédiments examinés). La densité moyenne de macroinvertébrés benthiques hors dreissènes au sein des quadrats témoins réalisés par les plongeurs était de 1019 ind./m² à Thonon-les-Bains et 300 ind./m² à Hermance.

Tableau 1. Liste des invertébrés récoltés et abondances bruts au sein des échantillons obtenus par les plongeurs scientifiques (quadrats témoins), par l'utilisation du procédé d'aspiration (aspirateur) et par l'examen du sédiment après-aspiration (vase). Les colonnes grisées correspondent aux échantillons qui n'ont pas pu être réalisés du fait d'un changement brutal des conditions météorologiques au moment où les plongeurs opéraient. Les taxons en vert sont des espèces exotiques. Les effectifs de l'échantillon de vase numéro 1 sont à considérer avec prudence car celui-ci a été réalisé au moment du changement météo et correspond à un prélèvement anormalement volumineux.

			Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Thonon-les-Bains	Hermance	Hermance	Hermance	Hermance	Hermance	Hermance	Hermance	Hermance
			Quadrat témoin	Quadrat témoin	Quadrat témoin	Aspirateur	Aspirateur	Aspirateur	Vase	Vase	Vase	Quadrat témoin	Quadrat témoin	Quadrat témoin	Aspirateur	Aspirateur	Aspirateur	Vase	Vase
			N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2
Bivalvia	Corbiculidae	<i>Corbicula fluminea</i>	29	12	12	31	29		95	18									
Bivalvia	Sphaeriidae	<i>Pisidium sp.</i>							7	1				1					
Gastropoda	Hydrobiidae	<i>Potamopyrgus antipodarum</i>	430	132	120	392	32		924	299		30	23	76	100	141	239		
Gastropoda	Planorbidae	<i>Ancylus fluviatilis</i>							23	10				2	1		3	5	
Gastropoda	Lymnaeidae	<i>Radix auricularia</i>							1										
Crustacea	Pontogammaridae	<i>Dikerogammarus villosus</i>	9	11	6	18	38		88	16		6	33	40		18	7	1	4
Crustacea	amphipodes dégradés et non déterminables			1					5								2		
Gastropoda	Physidae	<i>Physa acuta</i>					2		4				2				4		
Diptera	Chironomidae								24	2		3	3	1				1	
Achaeta	Erpobdellidae	<i>Erpobdella testacea</i>	1		1				1				3			3	1		1
Oligochaeta							4		4			1							
Decapoda	dégradé & petit - non déterminable						1		1										
		Abondance	469	156	139	441	106		1177	346		40	66	119	100	165	258	2	1
		Richesse	4	3	4	3	6		11	6		4	6	5	1	4	5	2	1

Sur les 11 taxons récoltés, 4 sont des espèces invasives : le bivalve d'origine asiatique *Corbicula fluminea*, le gastéropode néo-zélandais *Potamopyrgus antipodarum*, le gastéropode nord-américain *Physella (Haitia) acuta*, le crustacé ponto-caspien *Dikerogammarus villosus*. *P. antipodarum* est ultra dominant et représente 909 ind./m² à Thonon-les-Bains et 172 ind./m² à Hermance, soit 89 et 57 % respectivement des invertébrés hors dreissènes. Le second taxon le plus abondant est *D. villosus* à Hermance (105 ind./m²) et *C. fluminea* à Thonon-les-Bains (70 ind./m²). L'ensemble des 4 espèces invasives hors Dreissènes représente au final 99,5 et 93,3 % des invertébrés hors dreissènes à Thonon-les-Bains et Hermance, respectivement. Les quelques autres invertébrés observés étaient des espèces communes sans enjeux particuliers comme des sangsues *Erpobdella testacea*, des larves de diptères chironomes (majorité de *Chironomini*), des Gastéropodes *Ancylus fluviatilis* collés à des quaggas, des oligochètes.

A Thonon-les-Bains, la densité moyenne des invertébrés aspirés hors dreissènes, 1094 ind./m², est très comparable à celle de la zone témoin, alors que la profondeur du prélèvement réalisé par aspiration est plus importante. On ne peut pas savoir si une part des invertébrés aspirés sont retournés au milieu après aspiration ou si ce résultat révèle qu'il n'y a que la couche superficielle qui était habitée par des macroinvertébrés benthiques. L'examen des échantillons post-aspiration n'est pas fiable ici car les prélèvements réalisés par les plongeurs étaient exceptionnellement volumineux (6,7 et 3,4 kg). Le plus gros des deux comprenait plus de 900 individus de *P. antipodarum*, ce qui n'est pas forcément représentatif de la zone de test.

A Hermance, les individus aspirés sont deux fois plus nombreux (697 ind./m²) que la densité de la zone témoin. Ce résultat est lié à une surabondance des *P. antipodarum* qui représentent en moyenne 640 ind./m². Par contre, les échantillons post-aspiration sont très pauvres avec moins de 16 ind./m² non dreissènes.

Aucun taxon nouveau n'a été prélevé par aspiration sur les stations d'étude par rapport à ce qui a été échantillonné par les plongeurs scientifiques.

Discussion et conclusions

L'objectif de cette étude était double : évaluer l'efficacité d'un procédé d'aspiration des quaggas sur deux stations à 20 m de profondeur et mesurer les dégâts collatéraux potentiels sur la faune en place hors dreissènes.

En termes d'efficacité, le test a été réalisé sur les sites de Thonon-les Bains et Hermance qui abritent des biomasses comparables de quaggas de 5,57 et 6,21 kg/m², estimées à partir de prélèvements réalisés sur des zones témoins par des plongeurs scientifiques. Ces valeurs sont extrêmement fortes si on les compare aux 1,2 kg/m² en moyenne observés sur des sites quasiment identiques et très proches, en 2022, avec le même protocole et les mêmes opérateurs (Beisel et al., 2023). Il y a donc 5 fois plus de biomasse au moment du test que 3 ans auparavant. Le nombre d'individus est cependant très différent entre les deux sites : 14300 ind./m² en moyenne à Thonon-les-Bains et 8500 ind./m² à Hermance. Le site de Thonon-les-Bains abrite ainsi à 20 m de profondeur une population en voie de renouvellement avec une génération de jeunes (petits) individus bien représentée (environ 20 % des individus) mais peu de très grands individus. A Hermance, les jeunes individus sont absents et la population est vieillissante avec une grande proportion de vieux individus. Les différences de densité et de répartition en taille expliquent que l'on aboutisse à des biomasses sur le fond qui sont équivalentes.

L'aspirateur s'avère extrêmement efficace car (i) il retire du fond en quelques secondes une quantité de moules entières et de coquilles supérieure à ce qui a été échantillonné par les plongeurs, (ii) tout le spectre de taille des moules est retiré, des plus petites aux plus grandes. Les quantités de quaggas vivantes retirées sur les fonds sont 1,6 fois celle observées par les plongeurs (près de 10 kg/m²) car la profondeur d'aspiration du dispositif testé est bien supérieure à l'épaisseur de la couche superficielle prélevée lors des échantillonnages par les plongeurs sur des zones témoins (4 à 5 cm environ). Une autre donnée intéressante est que la quantité aspirée de coquilles plus ou moins brisées d'individus morts représente une masse au moins équivalente à celle des individus entiers, ce qui porte à 20 kg/m² la biomasse issue de dreissènes extraite par le procédé. Il s'agit très majoritairement de coquilles de quaggas mais elles pouvaient contenir des coquilles de zebras. Cette espèce a rapidement fortement déclinée depuis l'arrivée de la quagga (Beisel *et al.*, 2023) et seuls quelques individus vivants ont été observés lors de ce test. Pour autant, il reste sur le fond du lac des coquilles de cette espèce mélangées à celles de quaggas.

Deux observations qualitatives complètent ces résultats. La première est que lors des dépouillements, des agrégats de quaggas ou de plus rares agrégats de quaggas et cailloux ont été observés dans les échantillons témoins récupérés par les plongeurs et dans les échantillons retirés par l'aspiration. L'aspiration détruit une part des agrégats dans la mesure où elle engendre un détachement des moules les unes des autres. Une analyse statistique de ce qui est trouvé dans l'un et l'autre n'aurait par conséquent pas de sens mais il est indéniable que l'aspiration était suffisante pour aspirer des agrégats. La seconde observation est que les moules qui étaient vivantes au moment de l'aspiration n'étaient pas abimées lorsqu'on les récupère. Nous n'avons pas observé de coquilles cassées sur des animaux entiers.

Le second objectif était d'évaluer les dégâts collatéraux de l'aspiration sur les macroinvertébrés benthiques autres que la moule quagga. Pour cela, les échantillons prélevés par les plongeurs scientifiques servent de témoin. Leur examen révèle que le fond du lac sur les sites d'étude est d'une grande pauvreté. La densité d'individus hors dreissènes est très faible (autour de 1000 ind./m²) avec une diversité de seulement 11 taxons. Quatre de ces 11 taxons sont des invasives qui représentent plus de 93 % des individus. C'est le petit gastéropode exotique *Potamopyrgus antipodarum* (4 à 5 mm) qui domine largement avec, à lui seul, 89 et 57 % des individus à Thonon-les-Bains et Hermance, respectivement. L'aspiration entraîne très majoritairement

avec les quaggas le cortège des autres invasives et quelques rares individus de taxons assez communs (e.g., Diptères Chironomidae, Gastéropode *Ancylus fluviatilis*). Les densités retrouvées avec les quaggas sont très cohérentes avec ce qui a été observé par les plongeurs. Après l'aspiration, les vases examinées comprennent encore quelques individus de ces taxons, tout comme elles comprennent encore quelques quaggas. Les sédiments du lac semblent se présenter comme un millefeuille de quaggas vivantes sur la couche superficielle avec une couche de quaggas et coquilles au-dessous puis une couche de coquilles avec de la vase au-dessous encore. Compte-tenu de la pauvreté des fonds du lac sur les sites d'étude en espèces natives et de la dominance d'autres espèces invasives, l'impact de l'aspiration a été minime en termes de dégâts collatéraux sur la biodiversité en place.

Le test réalisé dans le Léman est une opération relativement inédite et je n'ai pas trouvé de littérature qui permette de comparer ce qui a été fait. Dans leur ouvrage sur les suivis et le contrôle des mollusques invasifs, Mackie & Claudi (2010) ne consacrent que quelques lignes au retrait mécanique de dreissènes (la moule zébrée) par des plongeurs. La seule source citée est un résumé de colloque qui relate une expérience menée en 1990 dans l'Ontario mais qui étaient consacrée à des surface artificielles. Il semble cependant que plusieurs essais aient pu avoir été faits en Amérique du Nord dans des contextes industriels mais sans que ces retours d'expériences ne soient publiés et/ou accessibles. Mackie & Claudi (2010) concluent cependant que le retrait mécanique est une option viable pour le nettoyage de structures.

A l'issue du dépouillement de ce test, le procédé d'aspiration en milieu naturel s'est avéré efficace pour extraire les quaggas et les coquilles d'individus morts du fonds du lac. Pour autant, dans les conditions testées, il restait des individus quaggas sur les zones de test, l'organisation en 3D des grappes d'individus favorisant une épaisseur importante d'individus vivants. Les macroinvertébrés autres que quagga étaient peu nombreux et étaient représentés surtout par des invasives. L'aspiration les a extraits mais sans que cela puisse être jugé comme préjudiciable à l'environnement. Les emplacements nettoyés de leurs dreissènes à l'issue de l'aspiration constituent une oasis d'habitats libres qu'il serait intéressant de suivre dans le temps pour en évaluer les potentiels bénéfices sur la biodiversité et/ou la vitesse de recolonisation par la moule quagga.

Références bibliographiques

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.

Beisel J.N., Domaizon I., Jacquet S., Guillard J., Trunfio N., Rautureau C., Grimond J., Rimet F., Vautier M. (2023). Mise au point d'un protocole de quantification (sur la base d'une comparaison de méthodes) des populations de dreissènes (*Dreissena polymorpha* et *Dreissena rostriformis bugensis*) au sein du Léman et premières évaluations in situ. Rapport d'étude 2022 pour la CIPEL. 20 p.

Bhattacharya GG (1967) A sample method of resolution of a distribution into Gaussian components. *Biometrics* 137: 137–143.

Haltiner, L., Zhang, H., Anneville, O., De Ventura, L., DeWeber, J. T., Hesselschwerdt, J., ... & Dennis, S. R. (2022). The distribution and spread of quagga mussels in perialpine lakes north of the Alps. *Aquatic invasions*, 17(2), 153-173.

Haubrock, P. J., Cuthbert, R. N., Ricciardi, A., Diagne, C., & Courchamp, F. (2022). Economic costs of invasive bivalves in freshwater ecosystems. *Diversity and Distributions*, 28(5), 1010-1021.

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. (2020). Flux d'espèces exogènes envahissantes benthiques dans le Léman. *Rapp. Comm. Int. Prot. Eaux Léman*, Campagne 2019. 212-221.

Lods-Crozet B., Chevalley P.A. (2018). Flux d'espèces envahissantes benthiques, implications sur l'écosystème lacustre de grands lacs périalpins. *Rapport de la Direction Générale de l'Environnement/Protection des eaux du Canton de Vaud*, 20 pp.

Mackie, G. L., & Claudi, R. (2010). *Monitoring and control of macrofouling mollusks in fresh water systems*. CRC Press, 508 p.

Pérez-Fuentetaja, A., Clapsadl, M. D., Lee, & W. T. (2014). Comparative role of dreissenids and other benthic invertebrates as links for type-E botulism transmission in the Great Lakes. In: Nalepa, T. F. & D. Schloessers (Eds.), *Quagga and Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control*. 2nd Ed. Taylor and Francis, 705-712.

Pimentel, D., Zuniga, R., & Morrison, D. (2005). Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological economics*, 52(3), 273-288.

Trunfio, N., Bournonville, T., Debortoli, N., Marescaux, J., Nogaro, G., & Beisel, J. N. (2023). Demographic and genetic structure of the quagga mussel, *Dreissena rostriformis bugensis*, in the Moselle River ten years after first observation. *Aquatic Invasions* 18(2): 199-218.

Vanderploeg, H. A., Wilson, A. E., Johengen, T. H., Bressie, J. D., Sarnelle, O., Liebig, J. R., ... & Horst, G. P. (2013). Role of selective grazing by dreissenid mussels in promoting toxic *Microcystis* blooms and other changes in phytoplankton composition in the Great Lakes. *Quagga and zebra mussels: Biology, impacts, and control*, 509-23.