



Moule Quagga: concept de monitoring et recommandations sur les mesures de prévention et de protection

Sylvie Flämig
Mathys Bourqui
Josephine Alexander
Lars Sturm
Noemi Wellauer
Piet Spaak

Mentions légales

eawag
aquatic research



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement
OFEV

Commission fédérale d'experts pour
la sécurité biologique CFSB

Éditeur

Eawag: Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau
Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf, www.eawag.ch

Ce rapport d'experts a été financé par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et la Commission fédérale d'experts pour la sécurité biologique (CFSB).

Auteurs

Sylvie Flämig¹, Mathys Bourqui², Josephine Alexander², Lars Sturm², Noemi Wellauer², Piet Spaak²

¹ Bureau de l'environnement m|u|t

² Eawag, Département Ecologie aquatique

Citation

Sylvie Flämig, Mathys Bourqui, Josephine Alexander, Lars Sturm, Noemi Wellauer & Piet Spaak. (2024) Moule Quagga: concept de monitoring et recommandations sur les mesures de prévention et de protection
Edité par l' Eawag: Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau.
<https://doi.org/10.55408/eawag:33820>

Dübendorf, décembre 2024

Photos et illustrations

Toutes les photos et illustrations non marquées autrement sont la propriété de l'Eawag.

Photo page de couverture

Moule Quagga Monitoring sur le lac de Constance. Image: Keystone Gaetan Bally

Commanditaire :

Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Eau
Commission fédérale d'experts pour la sécurité biologique (CFSB)

Accompagnement par le mandant:

Marie-Sophie Renevier (OFEV), Elisabetta Peduzzi (CFSB), Julia Link (CFSB)

Réviseurs externes de base:

Catherine Folly (canton de Fribourg), Alexandra Kissling (canton de Zurich), Lukas De Ventura (canton d'Argovie).

Groupe d'accompagnement:

Cercle Exotique Groupe de travail « Néobiotes aquatiques ».



Les textes, les photos ainsi que tous les graphiques et tableaux sont soumis à la licence Creative Commons « Paternité 4.0 International ». Ils peuvent être librement reproduits, diffusés et modifiés à condition de mentionner la source et d'envoyer un justificatif à medien@eawag.ch.

Pour plus d'informations sur la licence, consultez <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.

Résumé

Des moules quagga ont été détectées pour la première fois à Bâle en 2014 grâce à l'ADN environnemental (ADNe) (De Ventura et al. 2017). En 2016, des spécimens de moules quagga ont été découverts pour la première fois dans le lac de Constance. Dès 2021, des initiatives d'information et de sensibilisation à grande échelle ont été lancées en Suisse. Cependant, entre-temps, plusieurs grands lacs ont été envahis par cette espèce. Bien que la dynamique de propagation laisse présager un risque élevé de colonisation supplémentaire en Suisse, nous estimons que chaque année de retard dans l'arrivée des moules quagga dans un lac constitue un gain précieux. Sur le plan financier, cela permet de réaliser des économies, de disposer de plus de temps pour adapter les infrastructures, et de préserver l'état naturel des lacs aussi longtemps que possible. C'est pourquoi nous recommandons vivement que les mesures de protection et de surveillance des eaux décrites dans ce rapport soient mises en œuvre dans les plus brefs délais réalisables par tous les acteurs concernés. Ce rapport a pour objectif de faciliter cette démarche. Plus l'action sera rapide, plus ses effets seront bénéfiques.

L'expérience démontre que les mesures prises dès les premières phases d'une invasion sont non seulement rentables, mais aussi plus faciles à mettre en œuvre (cf. la stratégie suisse relative aux espèces exotiques envahissantes). Concernant la moule quagga, ainsi que d'autres espèces aquatiques envahissantes véhiculées par les mêmes vecteurs, il est essentiel que les efforts de prévention et de détection précoce se concentrent sur l'empêchement de leur introduction dans les eaux encore non contaminées et/ou sur la limitation de leur propagation à partir des lacs déjà infestés. Il est également important de tenir compte du fait que tous les cours d'eau peuvent potentiellement être colonisés par la moule quagga, ce qui signifie que tous les cantons, même ceux dépourvus de grands lacs, sont susceptibles d'être impactés.

L'utilisation de l'ADNe et de techniques avancées utilisant des vidéos et le prélèvement de sédiments est fondamentale pour surveiller l'invasion de la moule quagga. D'une part, elle permet une détection précoce : les autorités compétentes doivent savoir si un lac est infesté ou non. Les lacs non infestés devraient être analysés au moins une fois par an par le biais de l'ADNe afin de détecter la présence de moules quagga et de repérer rapidement toute nouvelle propagation. Cette approche permet également d'évaluer l'efficacité des mesures de protection mises en place.

Nous estimons que la mesure de protection la plus efficace pour prévenir l'introduction de la moule quagga dans de nouveaux cours d'eau est l'obligation de déclarer et de nettoyer les bateaux, comme cela a déjà été mis en place autour du lac des Quatre-Cantons, dans le canton de Berne et au lac de Hallwil, idéalement en complément de prélèvements d'échantillons dans les cours d'eau pour une détection précoce. Ces mesures devraient être étendues à l'ensemble de la Suisse ainsi qu'aux eaux frontalières internationales. Il est crucial de rappeler que ces actions ne visent pas « seulement » à lutter contre la moule quagga, mais aussi à empêcher l'introduction et la propagation d'autres espèces envahissantes.

Bien que « l'on ne puisse plus de débarrasser de la moule quagga » une fois qu'elle est établie, il reste crucial de réaliser des échantillonnages réguliers et standardisés dans les lacs infestés. En effet, pour les lacs profonds des Préalpes européennes, les connaissances de base sur la dynamique des populations de moules quagga et leurs effets à long terme sur les écosystèmes restent limitées. Jusqu'à présent, nous nous appuyons sur les expériences menées dans les Grands Lacs nord-américains, mais le public manifeste un fort besoin d'évaluer les conséquences pour nos propres lacs. Cela souligne l'importance de mener des études supplémentaires dans nos eaux.

C'est pourquoi nous recommandons de surveiller régulièrement (tous les 1 à 2 ans) et à grande échelle certains lacs déjà étudiés en détail par des instituts de recherche. Quant aux autres lacs infestés, ils devraient faire l'objet d'analyses annuelles, mais à une échelle plus réduite. Nous préconisons l'utilisation de méthodes d'échantillonnage éprouvées en Amérique du Nord, telles que le Ponar et le BIS, afin de permettre une comparaison des résultats suisses au niveau international.

Les échanges avec diverses parties prenantes dans le cadre de ce projet ont clairement révélé un besoin important d'informations et de soutien centralisés pour la mise en œuvre des mesures de prévention, de gestion et de suivi, tant de la part des cantons que d'autres acteurs tels que les services d'eau potable et les parties prenantes locales. Nous estimons donc qu'un service central temporaire, spécialisé dans la moule quagga et capable d'apporter un soutien à ces acteurs, serait particulièrement bénéfique. Ce centre pourrait également accompagner les cantons en leur fournissant des conseils et, si nécessaire, des équipements d'échantillonnage à l'emprunt.

Table des matières

1	Contexte initial	6
2	Objectif et groupes cibles du présent document.....	7
3	Dommmages connus causés par la moule quagga	8
3.1	Dommmages économiques	8
3.2	Dommmages écologiques	8
3.3	Impacts sociaux ou sanitaires	9
4	Analyse des vecteurs de propagation de la moule quagga en Suisse	10
5	Recommandations sur les mesures de prévention et de protection	12
5.1	Pour les eaux ne contenant pas de moules quagga.....	12
5.1.1	Commentaire préliminaire	12
5.1.2	Détection précoce	12
5.1.3	Aide à la priorisation des cours d'eau	12
5.1.4	Mesures visant à empêcher la propagation de la moule quagga	13
5.2	Pour les eaux où l'on trouve des moules quagga	18
5.2.1	Mesures de gestion pour éviter la propagation	18
5.2.2	Mesures de lutte	18
5.2.3	Mesures d'adaptation technique.....	18
6	Concept de monitoring	20
6.1	Concepts	20
6.1.1	Détection précoce / recensement de la présence la moule Quagga au moyen de l'ADNe	20
6.1.2	Surveillance à long terme des lacs infestés par la moule quagga.....	21
6.1.3	Citizen Science (notifications de la population)	22
6.2	Monitoring et communication.....	22
7	Conclusion et perspectives.....	23
8	Bibliographie	24
8.1	Littérature générale	24
8.2	Littérature du thème spécifique «Vecteurs»	25
9	Informations complémentaires	26
10	Annexes.....	27
10.1	SOPs pour le monitoring à long terme dans les lacs infestés (Eawag 2024).....	27
10.2	Extrait du rapport intermédiaire pour l'OFEV du 23.11.2023	27

1 Contexte initial

La moule quagga (*Dreissena rostriformis*), une espèce exotique envahissante, colonise actuellement les eaux suisses à un rythme rapide. Des études ont révélé qu'elle est également capable d'envahir les milieux occupés par la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), une autre espèce exotique. En effet, presque tous les cours d'eau suisses ont été envahis par la moule zébrée au cours des dernières décennies. Originaires de la mer Noire (région Ponto-Caspienne), ces deux espèces de moules sont désormais largement répandues dans de grandes parties de l'Europe et de l'Amérique du Nord. En Suisse, la moule quagga, récemment introduite (première détection en 2014), s'est rapidement propagée dans plusieurs lacs (voir figure 1), probablement via des transports terrestres de bateaux entre les lacs. Dans ces lacs infestés, elle a largement supplanté la moule zébrée. Alors que la moule zébrée préfère les substrats durs et colonise les eaux jusqu'à une profondeur d'environ 40 mètres, la moule quagga est capable de coloniser tous types de substrats, se reproduit de manière prolifique et envahit des zones lacustres jusqu'à de grandes profondeurs. Cependant, elle tolère moins bien les habitats soumis à des courants ou des vagues trop forts. Les femelles peuvent produire jusqu'à un million d'ovules par an, tandis que les mâles produisent une quantité encore plus importante de spermatozoïdes. Après une fécondation en pleine eau, les larves, de taille microscopique (50-150 µm), flottent dans l'eau avant de se fixer au substrat après plusieurs jours ou semaines. Contrairement à la moule zébrée, la moule quagga se reproduit tout au long de l'année, tolère des températures plus basses et connaît une croissance plus rapide.

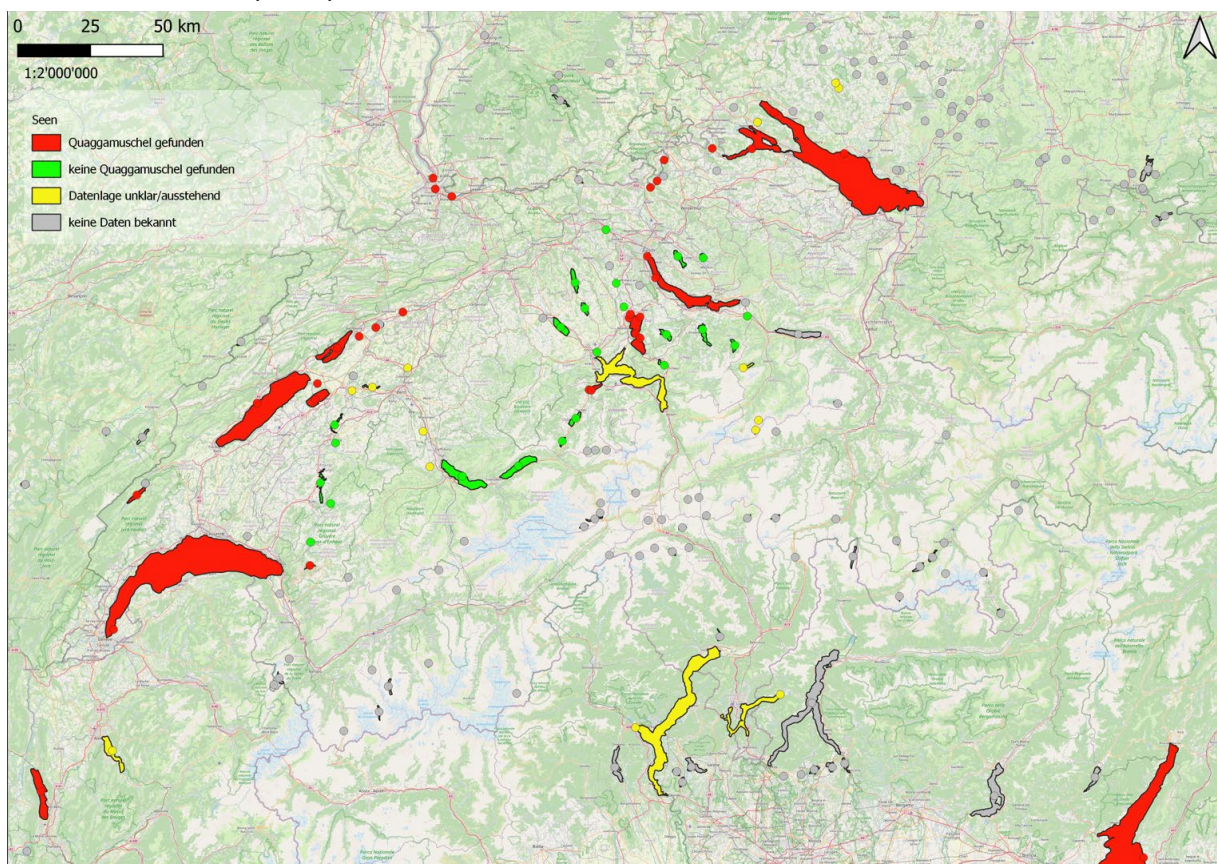


Illustration 1: État des cours d'eau suisses en termes de présence de la moule quagga exotique envahissante (*Dreissena rostriformis*), sur la base de sources bibliographiques et de littérature grise (articles de journaux, etc.). Etat des données : septembre 2024.

La rapidité de propagation et le potentiel de dommages élevé de la moule quagga confrontent divers acteurs en Suisse à d'importants défis, tant actuels que futurs. Il est urgent de protéger les eaux encore exemptes de cette espèce et de limiter les dommages potentiels. Les autorités et les autres parties prenantes manifestent un grand intérêt pour l'échange d'expériences, et lors des événements organisés à cet effet, un besoin de coordination et d'harmonisation des actions et des mesures a été clairement exprimé¹.

¹ Voir par exemple [le cours d'approfondissement PEAK V58/24 sur la moule quagga du 20 mars 2024](#), Cercle Exotique Groupe de travail « Néobiotes aquatiques ».

2 Objectif et groupes cibles du présent document

Ce rapport se divise en deux parties principales : Après les chapitres d'introduction, la première partie présente les recommandations de mesures pour les eaux non infestées par la moule quagga ainsi que pour celles touchées à un stade précoce de la colonisation (chapitre 5). L'objectif principal de ces mesures est d'empêcher la propagation de la moule quagga des eaux infestées vers les eaux non infestées. La deuxième partie propose des recommandations pour la détection précoce, ainsi qu'un concept de Monitoring à long terme de l'évolution de la propagation de la moule quagga en Suisse (chapitre 6).

Ce document s'adresse principalement aux services cantonaux directement impliqués, tout en informant également les autorités cantonales, les autres décideurs et les parties prenantes concernées par la mise en œuvre des mesures de protection et/ou de surveillance.

Les connaissances scientifiques sont mises en relation avec les expériences et les concepts issus de la pratique, afin de répondre aux questions fréquemment posées et de résumer les solutions pratiques, ainsi que les défis existants, dans une sorte de « manuel » pour la gestion de la moule quagga en Suisse.

La mise en œuvre des mesures proposées incombe aux autorités compétentes. Bien que ce rapport et les documents associés soient spécifiquement axés sur la moule quagga, ils devraient pouvoir être adaptés à d'autres néobiotes aquatiques envahissants.

3 Dommages connus causés par la moule quagga

3.1 Dommages économiques

Les moules quagga causent des dégâts en obstruant les tuyaux des prises d'eau, en envahissant ces installations, mais aussi en consommant la nourriture (phytoplancton, algues) des autres organismes vivants (zooplancton). De nombreuses études ont cherché à quantifier les coûts économiques de l'invasion de cette espèce (Colautti et al. 2006, Durán et al. 2012, Haubrock et al. 2021, Karatayev and Burlakova 2022). En Suisse, une estimation précise reste cependant difficile en raison du manque de vue d'ensemble des installations touchées et des dégâts occasionnés. Ce qui est certain, c'est que les coûts doivent se chiffrer en centaines de millions de francs suisses. Par exemple, l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et l'Université de Lausanne (UNIL) doivent actuellement renouveler l'ensemble de leur système de refroidissement en raison de l'invasion de la moule quagga, pour un coût estimé à plus de 50 millions de francs suisses. Le service des eaux de Bienne construit également une nouvelle station de captage d'eau « à l'épreuve de la moule quagga » (coût > 20 millions de CHF), qui devrait être terminée d'ici 2025 (<https://www.esb.ch/de/esb/projekte/erneuerung-seewasserwerk-ipsach/>). De nombreuses stations de traitement des eaux des lacs affectés (par exemple le lac Léman, le lac de Neuchâtel, le lac de Constance) font face à des coûts de nettoyage élevés et récurrents chaque année, ce qui conduit parfois à la planification de rénovations ou de nouvelles constructions. La station de captage et de traitement de l'eau du lac de Constance à Sipplingen (Bodensee-Wasserversorgung Sipplingen), par exemple, prévoit une transformation d'une valeur supérieure à 4 milliards d'euros, dont une partie de l'investissement est consacrée à l'ultrafiltration en raison de l'invasion des moules quagga. La présence de ces mollusques dans le lac entraîne un surcoût de plusieurs dizaines de millions d'euros pour cette nouvelle construction.

De nombreuses entreprises et municipalités n'ont pas divulgué publiquement leurs problèmes liés aux moules quagga, ou ne les ont pas encore identifiés. Il est donc probable que le nombre de cas non signalés soit considérable. De manière Générale, il est certain que le nettoyage des infrastructures (tuyaux, crépines, bateaux, pontons, etc.) mobilise des ressources importantes, bien que les coûts associés soient difficiles à estimer.

Enfin, les pêcheurs doivent de plus en plus souvent débarrasser leurs filets des moules quagga au lieu de poissons, ce qui entraîne des coûts supplémentaires. Il est également à prévoir que, dans le futur, les rendements de pêche diminueront en raison de la présence de ces moules.

En résumé, voici quelques-uns des coûts causés par la quagga:

- Dommages aux installations de captage et de traitement des eaux (colonisation de tuyaux, endommagement de filtres)
- Construction de nouvelles installations conçues pour limiter l'impact des moules (et de leurs larves)
- Élimination des moules sur les coques et moteurs de bateaux

3.2 Dommages écologiques

On craint que la moule quagga ne modifie profondément les écosystèmes des lacs suisses (Kraemer et al. 2023). Ce pronostic s'appuie sur les observations faites dans les lacs nord-américains, où la moule quagga a été introduite 25 à 30 ans avant son apparition en Suisse. Bien que les Grands Lacs d'Amérique du Nord soient beaucoup plus vastes, avec des temps de renouvellement d'eau plus longs que les lacs préalpins suisses, ils présentent des similitudes importantes en termes de profondeur, de teneur en nutriments et de température de l'eau. Par conséquent, on suppose que les populations de moules quagga pourraient se développer de manière similaire dans les lacs suisses (Kraemer et al. 2023).

Les conséquences écologiques potentielles pourraient inclure (Karatayev et al. 2006, Karatayev et al. 2015):

- Déclin du plancton
- Augmentation des nutriments dans les sédiments lacustres et diminution en eau libre
- Modification des communautés d'espèces et du réseau trophique
- Réduction des populations de poissons en raison de la perturbation de la chaîne alimentaire
- Déplacement des flux de nutriments de la zone pélagique (eau libre) vers le littoral (zone riveraine)
- Augmentation de la densité des poissons se nourrissant de moules quagga
- Diminution de la turbidité de l'eau, favorisant la croissance des algues benthiques (vivant au fond) et des macrophytes (plantes aquatiques, grandes algues)

Ce qui est particulièrement frappant en Amérique du Nord, c'est que la biomasse totale des moules quagga continue d'augmenter dans les lacs envahis (Karatayev et al. 2021b, Karatayev et al. 2022). Des modélisations ont révélé que la majorité des nutriments présents dans ces lacs se retrouvent emprisonnés dans les quaggas, les rendant ainsi inaccessibles au reste de l'écosystème. Un autre phénomène observé dans les lacs nord-américains est que la plupart des populations de moules quagga migrent vers des profondeurs croissantes (Karatayev et al. 2022). Par exemple, dans le lac Michigan, la densité maximale de moules est atteinte à une profondeur de 90 mètres, 30 ans après l'invasion, tandis que les densités dans les zones peu profondes ont diminué (Karatayev et al. 2021b).

Cependant, les connaissances sur les habitudes alimentaires, la croissance et la longévité de ces moules des grandes profondeurs restent insuffisantes, rendant difficile toute projection à long terme concernant leur impact sur les écosystèmes.

Dans les lacs riches en nutriments, l'effet de filtration des moules quagga peut améliorer la clarté et la transparence de l'eau. Des études américaines montrent même que la valeur immobilière a augmenté dans certains lacs infestés en raison de l'amélioration de la limpidité de l'eau (Karatayev and Burlakova 2022, Burlakova et al. 2023). De plus, aux Pays-Bas, il a été rapporté que les populations de moules dans les lacs peu profonds ont entraîné une hausse du nombre d'oiseaux aquatiques, augmentant ainsi la valeur écologique de ces plans d'eau (Pires 2005, Van Eerden and de Leeuw 2010).

Pour les lacs préalpains suisses, qui sont beaucoup plus profonds que les lacs néerlandais et généralement plus pauvres en nutriments, nous pensons que les effets néfastes de la moule quagga prédomineront sur d'éventuels effets bénéfiques. Cependant, il convient de noter qu'aucune donnée spécifique n'existe encore quant à l'impact de la moule quagga dans les eaux préalpines suisses riches en nutriments.

On peut s'attendre à ce que la moule quagga entraîne une diminution marquée de la productivité des écosystèmes aquatiques, affectant le phytoplancton, le zooplancton et les populations de poissons des plans d'eau touchés. Les conséquences de ce phénomène, combiné au réchauffement climatique, sur les lacs, notamment en ce qui concerne la teneur en oxygène dans les zones profondes, restent incertaines et nécessiteront des modélisations plus précises dans les années à venir.

L'invasion de la moule quagga pourrait également compromettre durablement la diversité écologique de ces lacs. Dans certains lacs suisses du Plateau, des efforts considérables ont été faits au cours des dernières décennies, avec des investissements de plusieurs dizaines de millions de francs, pour réduire la charge en nutriments et restaurer l'équilibre naturel. L'arrivée des moules quagga menace aujourd'hui de remettre en cause ces investissements, menaçant les progrès réalisés en matière de conservation et de restauration de la qualité des plans d'eau.

3.3 Impacts sociaux ou sanitaires

Aucun effet direct sur la santé humaine n'est connu pour les moules quagga et zébrées. Il existe toutefois un risque de blessure aux pieds par les coquilles de moules dans les zones de baignade. En dehors de cela, aucun effet sur la santé n'a été démontré.

Les moules ne sont pas toxiques, mais ne sont guère adaptées à la consommation en raison de leur petite taille.

4 Analyse des vecteurs de propagation de la moule quagga en Suisse

L'analyse des vecteurs de propagation d'une espèce exotique est une base cruciale pour planifier des mesures de prévention. L'objectif principal doit être de restreindre les voies d'introduction pertinentes. Le tableau 1 présente un aperçu des principaux vecteurs de propagation de la moule quagga et de la moule zébrée. La dispersion en tant que « passager clandestin », c'est-à-dire l'introduction involontaire sur ou dans un moyen de transport, est le vecteur le plus significatif (catégorie définie par la Convention sur la biodiversité de 1995). D'autres mécanismes de propagation incluent la dérive des larves vers l'aval dans un cours d'eau ou à l'intérieur d'un plan d'eau, ainsi que la connexion non naturelle entre bassins versants par le biais de centrales hydroélectriques (voir également le chapitre 5.1.2). Cette dérive larvaire n'a toutefois aucune incidence sur les cours d'eau isolés et les bassins versants non connectés.

Il existe peu d'études ciblant spécifiquement les vecteurs de propagation de la moule quagga. Cependant, ces vecteurs de dispersion étant très similaires pour les deux espèces étroitement apparentées, les moules quagga et zébrée sont traitées communément dans le tableau. En général, la moule quagga a un potentiel de dispersion légèrement inférieur, notamment en tant que « passager clandestin », car elle adhère moins fortement aux surfaces que la moule zébrée, rendant ainsi son transport par les bateaux de plaisance plus difficile (Karatayev and Burlakova 2022). De plus, les moules zébrées présentent des taux de survie plus élevés lorsqu'elles sont exposées à l'air libre sur de longues périodes, par rapport aux moules quagga (Ricciardi et al. 1995).

Les vecteurs de propagation (possibles) ont été identifiés à partir de recherches bibliographiques (voir la bibliographie en 8.2) ou d'exemples d'incidents connus. Pour de nombreux vecteurs, la propagation n'est pas clairement documentée et repose sur des indices ou des explications plausibles (propagation présumée). Ensuite, en s'inspirant de la formule d'évaluation des risques issue du domaine des dangers naturels, une tentative a été faite pour évaluer ces vecteurs en Suisse. Les différents vecteurs ont été analysés en fonction de la probabilité que la propagation se produise, du nombre potentiel d'événements de propagation, et du nombre d'individus propagés par événement. Il est important de noter que cette évaluation pourrait varier pour d'autres espèces aquatiques.

Pour la planification des mesures, il ne suffit pas de prendre en compte la pertinence du vecteur (appelé potentiel vectoriel), mais il est également crucial d'évaluer les possibilités d'influence sur ce vecteur. On peut aussi exprimer cela en termes de « levier » potentiel (c'est-à-dire, quel effort est nécessaire pour réduire de manière significative la propagation via ce vecteur ?). À cet effet, une classification est effectuée dans la dernière colonne (+++ = fort effet de levier). Pour élaborer le tableau, les retours d'experts issus de la recherche, des bureaux d'écologie², ainsi que des représentants des services cantonaux en charge de la protection des eaux et des néobiotes, ont été pris en compte. Ces contributions ont été collectées dans le cadre du groupe de travail Cercle Exotique « Néobiotes aquatiques », qui accompagne ce projet.

En raison de l'état parfois lacunaire des connaissances sur certains vecteurs (p. ex. les sports nautiques ou la pêche professionnelle et sportive), ce tableau ne doit pas être considéré comme absolu. Il sert avant tout à illustrer les différents facteurs d'influence sur la pertinence résultante d'un vecteur et à comparer les vecteurs entre eux.

Le tableau confirme l'état actuel des connaissances, à savoir que les bateaux de plaisance constituent le principal vecteur de distribution des moules quagga adultes en Suisse (De Ventura et al. 2016). Il y a près de 100 000 bateaux de plaisance et de sport immatriculés en Suisse. Les moules *Dreissena* peuvent en outre - en fonction de la taille de la moule, de la température et de l'humidité ambiante - survivre à un transport hors de l'eau de 5 à 15 jours sur un bateau (Ricciardi et al. 1995).

Le tableau montre également qu'il existe un potentiel d'action important pour limiter la propagation par les bateaux de plaisance. En effet, il est probable que l'influence globale des bateaux de plaisance puisse être sensiblement réduite par un effort proportionné de la part de la société (par exemple, en mettant en place un nettoyage professionnel des bateaux ou en adoptant des mesures pour restreindre leurs déplacements), ceci car le nombre d'organismes transportés par incident est estimé élevé dans ces cas. En comparaison, les efforts nécessaires pour réduire le risque de propagation via d'autres vecteurs de manière équivalente sont considérablement plus importants, surtout lorsque le nombre potentiel d'organismes par incident est faible, mais que le nombre d'incidents est élevé.

La propagation des larves véligères est généralement moins bien étudiée. Il est cependant établi que le transport dans les citernes d'eau de ballast joue un rôle clé dans la propagation mondiale (Karatayev and Burlakova 2022). Toutefois, ce vecteur de propagation est peu pertinent en Suisse, car seule une petite section du Rhin près de Bâle est navigable pour les bateaux de marchandises.

Les vecteurs naturels, en particulier les oiseaux aquatiques (transport dans le tube digestif ou dans le plumage) ne semblent pas non plus jouer un rôle décisif dans la propagation (Carlton 1993, Johnson and Carlton 1996, Karatayev

² p.ex. lors d'une rencontre SeeWandel Klima du groupe de travail « Importance of the quagga mussel », 19 mars 2024, Eawag

et al. 2003, Pollux et al. 2010). La distribution spatiale de la moule quagga en Suisse n'indique pas non plus que les oiseaux aquatiques soient un vecteur important.

D'autres études basées sur la compilation présentée dans le Tableau 1 pourraient aider à mettre en œuvre les mesures de manière encore plus ciblée, à affiner les recommandations concernant les mesures et répondre de manière plus fiable aux questions des « groupes potentiels de vecteurs » concernant leur propre risque (par exemple, lors de la pratique d'un certain sport nautique). Dans le cadre de telles études, il faudrait également évaluer davantage le succès des mesures mises en œuvre. Jusqu'à présent, il n'existe que des rapports anecdotiques sur le succès des mesures qui se concentrent sur les principaux vecteurs de propagation (p. ex. aux USA et Canada, voir article dans [Times Chronicle](#)).

Tableau 1, Estimation de la pertinence (potentiel vectoriel) de différents vecteurs de propagation possibles de la moule quagga et de la moule zébrée pour la Suisse

Vecteurs de propagation pour les moules <i>Dreissena</i>	Distribution documentée ou observée	Diffusion présumée (indices)	Probabilité	Nombre d'événements	Nombre d'individus/événement	Pertinence (potentiel vectoriel)	«Levier»
Transport sur la coque des bateaux de plaisance	X		Très élevée	Moyen	Haute		+++
Transport dans les moteurs/dans l'eau de refroidissement des bateaux de plaisance	X		Très élevée	Moyen	Moyen ?		++ ?
Transport dans les eaux de cale des bateaux de plaisance		X	Basse	Moyen	Bas		+++
Transport avec des plantes aquatiques enchevêtrées sur des bateaux de plaisance		X	Basse	Moyen	Moyen		+++
Transport avec des équipements de sports nautiques / des pièces d'équipement		X	Basse	Élevé	Bas		+
Transport avec équipement de plongée		X	Basse	Moyen	Très bas		++
Transport avec équipement de pêche et le matériel associé		X	Basse	Élevé	Très bas		+
Transport avec équipement lors de prélèvements effectués par des professionnels		X	Basse	Bas	Bas		++
Transport avec des engins flottants de génie hydraulique		X	Haute	Bas	Très élevé		+++
Vecteurs naturels		X	Basse	Bas	Bas		0
<i>Dérive des larves</i>	X		<i>Élevée*</i>	<i>Élevé *</i>	<i>Élevé</i>	*	<i>0*</i>
<i>Connexion non naturelle des bassins versants par l'hydroélectricité</i>	X		<i>Élevée</i>	<i>Élevé</i>	<i>Élevé</i>		<i>voir chap. 5.1.4</i>

* dans les cours d'eau et les eaux stagnantes

5 Recommandations sur les mesures de prévention et de protection

5.1 Pour les eaux ne contenant pas de moules quagga

5.1.1 Commentaire préliminaire

Étant donné les lourds dommages écologiques et économiques anticipés en cas d'infestation par les moules quagga, toutes les mesures doivent être prises pour empêcher leur propagation dans les lacs suisses du Plateau encore indemnes. La principale voie de propagation des moules quagga d'un lac à l'autre est le transport humain (voir chapitre 4).

Le chapitre consacré aux mesures de prévention et de protection est structuré en sous-chapitres qui suivent le déroulement typique d'une invasion de moules quagga : détection précoce, aide à la planification des mesures pour prioriser les cours d'eau, liste des mesures pour empêcher la propagation de la moule, et indications sur les mesures de gestion, de lutte et d'adaptation.

5.1.2 Détection précoce

La détection précoce de la moule quagga (ainsi que d'autres espèces envahissantes) est essentielle pour mettre en place, gérer et ajuster les mesures destinées à prévenir leur expansion. Des actions ciblées peuvent ainsi freiner ou empêcher une nouvelle propagation. Étant donné qu'il s'agit de mesures de surveillance, la détection précoce est abordée dans le cadre du concept de monitoring présenté au chapitre 6.

5.1.3 Aide à la priorisation des cours d'eau

La question de la priorisation des cours d'eau en matière de gestion de la moule quagga revient fréquemment. Cependant, d'un point de vue écologique, il est actuellement difficile d'établir des priorités entre les lacs. La moule quagga se propage rapidement et de manière extensive ; en théorie, tous les plans d'eau de Suisse peuvent être infestés, notamment ceux où la moule zébrée est déjà présente. C'est pourquoi nous recommandons de mettre en place des mesures de protection à large échelle, idéalement couvrant toute la Suisse ou en coordination avec les pays voisins, afin d'éviter un morcellement des réglementations. Il peut même être plus simple, et potentiellement plus avantageux, de déployer des mesures de prévention sur l'ensemble du territoire plutôt que de cibler certains cours d'eau. En Suisse, les cantons sont responsables des actions visant à prévenir la propagation des espèces invasives, ce qui en fait les principaux acteurs dans ce domaine. Cependant, une bonne coordination avec les autorités fédérales en charge de la gestion des eaux, des espèces envahissantes et de la coopération internationale est cruciale pour assurer le succès de ces efforts.

À ce jour, il n'est pas possible de définir des caractéristiques spécifiques aux différents cours d'eau en termes de facteurs d'exclusion ou de facteurs favorisant la propagation (comme la teneur en nutriments, l'altitude, ou la vitesse du courant). On peut seulement identifier certains facteurs d'influence potentiels (voir figure 2).

Des mesures de protection contre la propagation de la moule quagga devraient idéalement être appliquées partout. Cependant, si cela s'avère impossible, il serait envisageable d'établir des priorités en fonction des caractéristiques spécifiques des cours d'eau mentionnées dans la figure 2, ainsi que d'autres critères tels que le statut de protection ou la valeur écologique d'un cours d'eau, les enjeux financiers (comme la valeur des prises d'eau ou les coûts liés aux mesures de réhabilitation), ou encore l'importance stratégique d'un cours d'eau en tant que « tremplin de propagation des néobiotes ». Par exemple, un lac très fréquenté par les bateaux de plaisance pourrait être une source de dissémination vers d'autres plans d'eau locaux.

Une autre approche pour la priorisation pourrait consister à distinguer les mesures selon les objectifs à atteindre. Par exemple, on pourrait envisager des mesures de prévention à grande échelle ou ciblées, ou encore différencier dans le cadre du monitoring ce qui est absolument nécessaire de ce qui est additionnel. Cette hiérarchisation permettrait d'optimiser les ressources disponibles tout en maximisant l'efficacité des actions menées (voir également le chapitre 6).

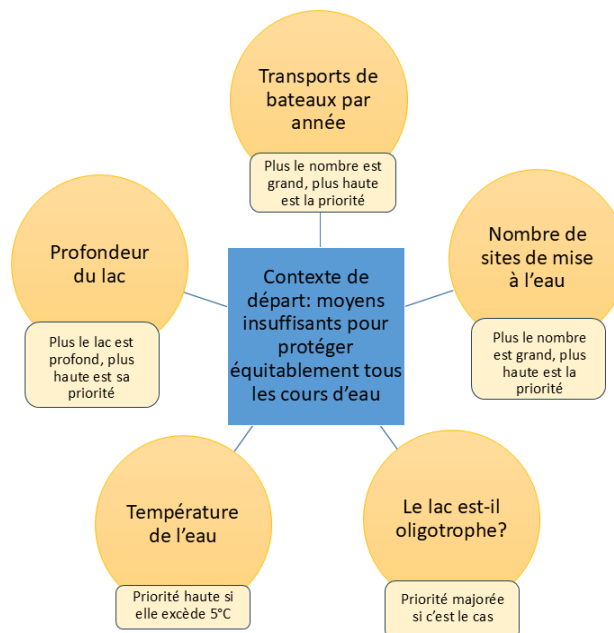


Figure 2 : Aide pour une éventuelle priorisation des cours d'eau non encore contaminés, situation en septembre 2024 (veuillez également tenir compte du texte du chapitre 5.1.3).

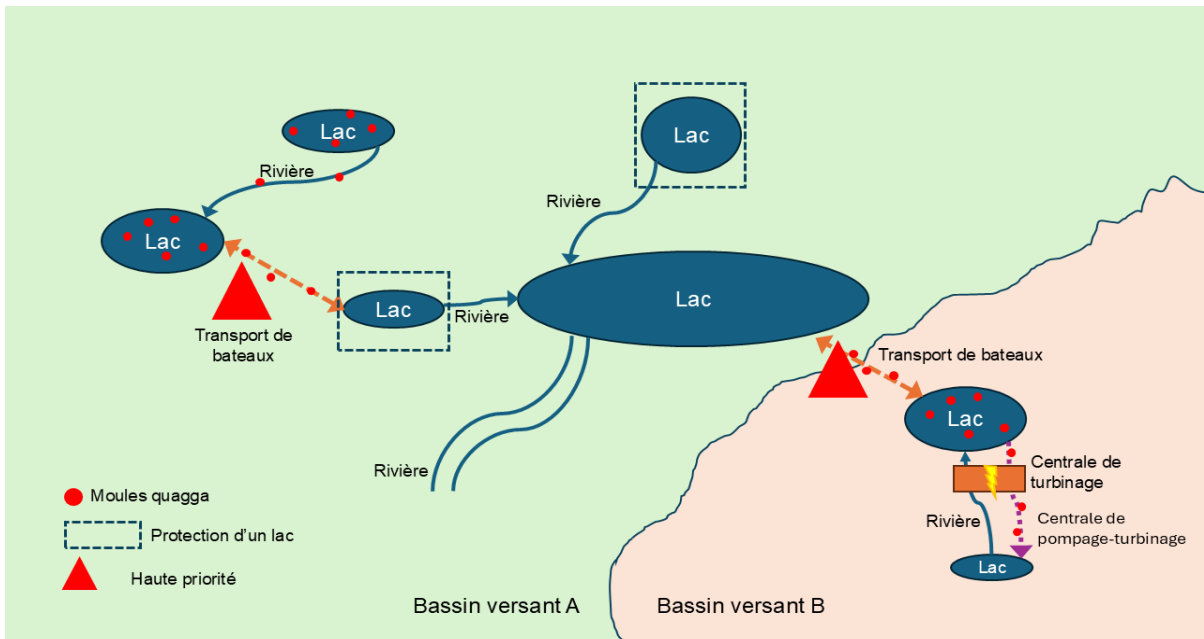


Figure 3 : Visualisation du problème concernant les connexions et les échanges possibles entre les plans d'eau (par exemple, un petit lac peut aider les moules quagga à atteindre un plan d'eau plus grand (stepping stones)).

La figure 3 illustre que les larves de quagga dérivent d'un lac à l'autre en aval (exemple : lac de Neuchâtel - lac de Bienné - Aar). Les mesures de protection doivent se concentrer sur les lacs non infestés, qui se trouvent en amont des lacs infestés. Il faut en outre veiller à ce qu'aucune moule quagga ne soit transportée entre les bassins versants. Un autre risque réside dans le fait que les larves de quagga soient transportées vers l'amont par une centrale de pompage-turbine (ligne violette, fig. 3). Le lac de l'Hongrin, qui a très probablement été colonisé de cette manière par des moules quagga depuis le lac Léman, en est un exemple.

5.1.4 Mesures visant à empêcher la propagation de la moule quagga

L'objectif des mesures pour limiter la propagation de la moule quagga est de freiner sa dispersion via les vecteurs identifiés (voir chapitre 4) ou de réduire significativement leur impact. Lors de la planification de ces mesures, la détection précoce ainsi que les informations issues des monitorings à long terme des lacs déjà infestés jouent un rôle crucial.

Un axe prioritaire consiste à sensibiliser les « groupes potentiels de vecteurs » (par exemple les plaisanciers ou les pratiquants de sports nautiques) en diffusant des recommandations concrètes et des consignes d'action. Un deuxième axe stratégique est d'encourager le nettoyage des bateaux, en particulier en développant et publiant des informations sur les emplacements des stations de nettoyage. Actuellement, plusieurs lacunes subsistent dans ce domaine. D'une part, il est essentiel de déterminer si les eaux usées issues du nettoyage des bateaux doivent être traitées avant d'être évacuées dans les réseaux d'assainissement, afin de respecter les normes de protection de l'eau. Les premières analyses (AUE 2019) et les inspections réalisées par les autorités indiquent qu'il est nécessaire d'approfondir cette question, indépendamment des mesures spécifiques liées à la moule quagga.

Une autre question tout aussi urgente est celle de la survie des larves de moule quagga dans les systèmes d'égouts et les stations d'épuration, bien que les experts estiment actuellement que les larves ne survivent pas au traitement des eaux usées.

La sensibilisation, la diffusion d'informations et la promotion du nettoyage des bateaux forment la base d'un ensemble de mesures plus strictes telles que les interdictions et les contrôles. Actuellement, la mise en place d'une obligation de nettoyage des bateaux dans divers cantons est au centre des préoccupations. Nous considérons cette mesure comme la plus prioritaire et urgente. Idéalement, elle devrait être étendue à l'ensemble de la Suisse, ainsi qu'aux eaux transfrontalières. Dans le cadre de cette obligation, plusieurs questions devraient être rapidement clarifiées, notamment : comment nettoyer efficacement les moteurs de bateaux pour éliminer les moules quagga ? Quels biocides ou autres méthodes sont suffisamment efficaces et bien étudiés pour que leur utilisation puisse être recommandée ?

Le tableau 2 présente un aperçu détaillé des mesures possibles dans tous les domaines d'action, avec une classification basée sur la situation actuelle en Suisse (état en septembre 2024).

Tableau 2: Aperçu des mesures de prévention (voir informations complémentaires pour des exemples)

Mesure ou groupe cible	Comment	Facteurs favorisants	Défis actuels pour la Suisse	Solutions possibles
Sensibilisation à la problématique & information sur des recommandations ou des instructions d'action concrètes				
Groupe cible : Utilisateurs privés de l'eau (sports nautiques et aquatiques, pêche, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Panneaux/affiches d'information au bord des cours d'eau - Produits d'information pour les associations (dépliants, autocollants, etc.) - Informations à travers le commerce, la location, les boutiques - Information par les formations / formations continues ('train the trainers') - Médias spécialisés, médias d'intérêt particulier 	<ul style="list-style-type: none"> - Certains cantons et parties prenantes sont déjà très actifs dans ce domaine : l'effet de reconnaissance pour le groupe cible augmente. - Les affiches/panneaux sur place sont jugés particulièrement efficaces (voir les évaluations des cantons AG/ZH, sur demande). 	<ul style="list-style-type: none"> - Harmonisation des campagnes (visuelle et du contenu) - Peu d'évaluation de telles campagnes - Les utilisateurs de l'eau non organisés sont difficiles à atteindre - « Concurrence » de différentes campagnes environnementales sur les cours d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Uniformiser les campagnes au niveau national ou régional - Évaluer les campagnes et rendre les connaissances accessibles à tous - Intégrer le commerce spécialisé, les boutiques de sports nautiques - Planification ciblée des mesures, accords entre les campagnes
Groupe cible : Détenteurs de bateaux de plaisance immatriculés	Via les offices cantonaux de la navigation, par ex. avec l'envoi de la facture fiscale en début d'année	Les informations accompagnées d'une lettre officielle reçoivent plus d'attention que les simples courriels d'information, newsletters, etc.	Les utilisateurs de bateaux étrangers ou non immatriculés ne sont pas atteints.	Impliquer les autorités douanières, contrôles lors de l'importation de bateaux de plaisance de l'étranger
Groupe cible : Grand public/population	<ul style="list-style-type: none"> - Médias classiques (journaux, TV) - Médias sociaux 	Le thème de la moule quagga suscite un grand intérêt dans les médias (« Flagship Species »)	Les médias sociaux : Les autorités ont parfois encore peu d'expérience, les posts via les canaux généraux n'atteignent pas le groupe cible	Collaboration avec des campagnes nationales ou supracantoniales avec expertise en médias sociaux
Groupe cible : Utilisateurs professionnels des eaux : Secteur de la navigation	Informations techniques pratiques pour les chantiers navals, les constructeurs de bateaux, les exploitants de ports, etc. via les associations et les communes	<ul style="list-style-type: none"> - Le secteur est sensibilisé - Le secteur est un bon multiplicateur 	Des connaissances spécialisées sur la moule quagga encore partiellement inexistantes	Plus d'accent sur l'information sectorielle

Mesure ou groupe cible	Comment	Facteurs favorisants	Défis actuels pour la Suisse	Solutions possibles
Groupe cible : Utilisateurs professionnels de l'eau : Concessionnaires, p. ex. entreprises d'eau potable, utilisation thermique (chauffage/refroidissement), centrales électriques	Informations spécialisées : Prévenir le transfert au-delà des bassins versants, préparation des installations techniques	L'industrie s'intéresse au sujet	Les concessionnaires n'ont longtemps pas été suffisamment informés Besoin de rattrapage	Collaboration avec l'association SSIGE et les services cantonaux pour l'attribution de concessions pour le captage d'eau de mer
Groupe cible : Maîtres d'ouvrage de captages d'eau nouvellement planifiés, bureaux d'ingénieurs <i>(mesure de limitation des dommages, pas de prévention)</i>	Remarque ou condition dans l'expertise pour la construction de nouveaux captages d'eau <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Construction d'un captage obsolète et/ou de systèmes de nettoyage		La planification est terminée lorsque le canton évalue le projet de construction	Sensibilisation précoce des planificateurs
Promotion du nettoyage des bateaux et du matériel lors des changements de cours d'eau				
Offre suffisante de lieux de nettoyage appropriés	Création ou réaffectation de postes de nettoyage (p. ex. postes de nettoyage pour camions, camping cars, etc.)	L'obligation de nettoyage dans divers cantons incite les entreprises à proposer des nettoyages de bateaux (devient plus lucrative ?)	<ul style="list-style-type: none"> - Le déversement d'eau de lavage de bateaux dans les égouts sans prétraitement (p. ex. séparateurs) peut poser problème. - On ne sait pas si l'offre actuelle de stations de nettoyage est suffisante, les chiffres concernant les bateaux qui changent effectivement d'eau ne sont pas connus. - Les experts s'accordent à dire que les larves de quagga ne devraient pas être en mesure de survivre aux STEP, mais cela n'a pas encore été étudié directement. - Faut-il des postes de nettoyage spécifiques pour les équipements de sports nautiques et l'équipement correspondant? 	<ul style="list-style-type: none"> - Rassembler les expériences, renforcer les contrôles des entreprises - Le cas échéant, (re)collecter les chiffres relatifs aux navires changeant de cours d'eau - Recherche sur la survie de la moule quagga dans les STEP

Mesure ou groupe cible	Comment	Facteurs favorisants	Défis actuels pour CH	Solutions possibles
Registre public des centres de nettoyage de navires autorisés	Informations en ligne faciles à trouver, par exemple aussi pour les utilisateurs étrangers, intégration dans les applications de cartes marines et les fiches d'information pour les touristes.		Faut-il une carte centrale à l'échelle nationale/suprarégionale ?	
Instructions de nettoyage pour les bateaux et les équipements de sports nautiques	<ul style="list-style-type: none"> - Pour l'autonettoyage : des instructions claires - Nettoyage par du personnel compétent : si possible des SOP uniformes 		<ul style="list-style-type: none"> - Lacunes partielles dans les connaissances et les recommandations pratiques de nettoyage - Coûts plutôt élevés pour un nettoyage professionnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Partage d'expériences - Travail de recherche sur le développement des recommandations de nettoyage ou sur des approches alternatives
Obligations, interdictions et contrôles				
Conditions dans les autorisations administratives	Prescriptions relatives au nettoyage des machines et des appareils, p. ex. dans les permis d'aménagement des eaux et les permis nautiques.	Un moyen simple d'établir des directives basées sur les risques	Pas encore utilisé à grande échelle, conditions si possible identiques partout	Viser une harmonisation à l'échelle nationale, en tenant compte des différentes législations cantonales
Obligation générale de nettoyage des navires	Voir par exemple l'obligation d'annoncer et de nettoyer les bateaux en Suisse centrale (2023/24), ct. BE (2024) ou ct. AG (2021), inscription dans la loi de l'obligation de nettoyer les bateaux.	Des projets pilotes permettent de recueillir les premières expériences pour la Suisse.	<ul style="list-style-type: none"> - Réglementation des eaux intercantionales et internationales - Pas de solution à l'échelle nationale pour l'instant 	Reprise/extension du modèle de la Suisse centrale à d'autres cantons/régions
Restrictions des mouvements de navires	Voir par ex. l'interdiction de mise à l'eau de bateaux extracantonaux dans les cantons de ZG, SZ, OW (2024) ou l'utilisation limitée de bateaux au lac de Halwill (indépendamment des mesures néobiologiques).	Le projet pilote permet de recueillir les premières expériences pour la Suisse.	<ul style="list-style-type: none"> - Pratique pour les eaux intercantionales et internationales - Incisif pour les utilisateurs des plans d'eau 	

Ce que	Comme	Facteurs favorisants	Défis actuels pour CH	Solutions possibles
Fermeture des eaux exemptes de moules quagga aux navires changeant d'eau / zones de libre accès	Voir par ex. projet pilote Pfäffikersee ct. ZH, interdiction de mise en eau des lacs de Greifen, de Pfäffikon et du Türlerseer (ct. ZH, 2024)	Le projet pilote a permis de recueillir les premières expériences pour la Suisse.	<ul style="list-style-type: none"> - Les données sur l'apparition de nouvelles espèces doivent être collectées et rapidement disponibles. - Incisif pour les utilisateurs de l'eau 	
Inspections ou nettoyages de navires basés sur l'estimation des risques	Avec des enquêtes préalables avant la mise à l'eau, voir exemples USA (Elwell et Phillips 2021)		Effort important	
Interdiction nationale des installations de pompage d'eau qui relient les bassins versants			Conflit d'objectifs avec l'hydroélectricité	Les espèces invasives et leur introduction potentielle doivent être prises en compte lors de l'examen des projets.
Contrôles				
Contrôles aléatoires sur les plans d'eau et aux points d'immersion	Voir par exemple l'obligation de nettoyage du Hallwilersee (AG), l'obligation d'annoncer et de nettoyer les bateaux en Suisse centrale et dans le canton de BE.	Une plateforme électronique de déclaration en Suisse centrale et à BE facilite les contrôles	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite des ressources humaines et/ou une solution technique (car pas de base de données nationale sur la navigation) 	
À la douane			Pas de concept ni d'application pratique à ce jour	
Barrières aux points d'immersion	Voir par ex. cantons ZG et AG	Les premières expériences sont en cours	<ul style="list-style-type: none"> - Mesures de construction nécessaires - Nombre de points d'immersion très variable selon les plans d'eau - Il n'existe souvent pas de vue d'ensemble des sites et des opérateurs - Acceptation éventuellement difficile, surtout aux points d'immersion jusqu'ici publics 	Évaluer et échanger les expériences
Plombes pour bateaux et remorques	Voir par exemple USA Lake Tahoe		Uniquement utile comme mesure supplémentaire	

5.2 Pour les eaux où l'on trouve des moules quagga

5.2.1 Mesures de gestion pour éviter la propagation

Une fois qu'un cours d'eau est colonisé par des moules quagga, la priorité doit être donnée à la prévention de la propagation vers d'autres cours d'eau encore non infestés. Pour ce faire, les mêmes mesures que celles recommandées pour les eaux non encore touchées sont pertinentes (voir chapitre 5.1). Ces interventions sont qualifiées de « mesures de gestion » dans ce rapport. À ce jour, il n'existe pas de mesures d'atténuation ou de lutte efficaces pour éradiquer les moules quagga une fois qu'elles se sont établies (voir chapitre 5.2.2). En outre, des mesures d'adaptation sont nécessaires pour les entreprises et les installations qui utilisent de l'eau lacustre ou qui possèdent des infrastructures en contact direct avec l'eau (voir chapitre 5.2.3).

5.2.2 Mesures de lutte

Pour les lacs de la taille des lacs suisses, aucune méthode de lutte réaliste, tant du point de vue écologique qu'économique, n'a été identifiée jusqu'à présent, malgré plusieurs tentatives (Karatayev and Burlakova 2022). Dans les cours d'eau, la lutte contre les moules quagga est encore plus complexe, car les larves sont transportées vers l'aval par le courant. Ainsi, toute tentative de lutte serait envisageable uniquement si la source des larves pouvait être éliminée simultanément. Bien que certaines études montrent que certaines espèces de poissons peuvent apprendre à consommer des moules quagga (Baer et al. 2022), il n'existe pas d'exemples documentés d'évolution vers un équilibre écologique stable.

Aux États-Unis, diverses méthodes ont été testées avec des succès variables. Toutefois, les approches chimiques (comme l'utilisation de niclosamide, de chlorure de potassium ou de sels de cuivre) seraient illégales en Suisse et financièrement impraticables. À titre d'exemple, un petit réservoir en Pennsylvanie a été débarrassé des moules quagga grâce à des sels de cuivre (Hammond et Ferris 2019). Cependant, les concentrations de cuivre utilisées étaient élevées, et leurs effets sur l'écosystème restent incertains, rendant cette méthode inapplicable dans le contexte suisse.

Les approches physiques (comme l'utilisation de tapis benthiques, l'abaissement du niveau des lacs en hiver, ou encore l'élimination manuelle ou mécanique) ne sont pas adaptées à des plans d'eau de grande taille. Plus de détails à ce sujet sont disponibles sur le site de l'*Invasive Mussel Collaborative* (Great Lakes Commission 2018).

Une méthode innovante, les « BioBullets » (www.biobullets.com) (Aldridge et al. 2006), consiste en des biocides encapsulés dans un matériau non toxique et comestible que les moules filtrent et absorbent, délivrant ainsi le poison directement aux moules ciblées. Cette approche réduit la quantité de biocide nécessaire et minimise l'impact sur l'environnement. Contrairement aux méthodes chimiques classiques, les BioBullets sont plus ciblés, réduisant les dommages aux espèces non visées, bien que les moules indigènes seraient également affectées. Toutefois, l'application pratique des BioBullets reste incertaine, raison pour laquelle leur utilisation n'est actuellement pas recommandée.

Des recherches sont également en cours sur des méthodes de contrôle génétique et sur d'éventuelles maladies affectant les moules quagga. Les premières analyses génétiques montrent que le génome des moules quagga présente des différences significatives entre les mâles et les femelles, ce qui suggère que la détermination du sexe est polygénique (Alexandra Weber, communication personnelle). Cela complique d'éventuelles interventions visant à modifier le sexe des moules pour contrôler leur population. Il est très incertain qu'il soit possible à l'avenir de produire des moules quagga stériles pour contrôler leur propagation, tout en limitant le risque de dommages écologiques et d'effets secondaires.

5.2.3 Mesures d'adaptation technique

Lorsque de l'eau est pompée à partir d'un plan d'eau infesté de moules quagga, que ce soit pour la production d'eau potable ou pour l'exploitation de systèmes de chauffage et de refroidissement, les larves de moules s'attachent aux installations, obstruent les tuyaux et les filtres, et peuvent même bloquer le fonctionnement de l'équipement. Actuellement, pour l'utilisation de l'eau potable, l'ultrafiltration semble être la méthode privilégiée. Combinée à une prise d'eau équipée d'un système de nettoyage mécanique, cette technologie permet de prélever de l'eau (potable) même dans des lacs infestés par les moules quagga. Une installation de ce type, «résistante aux moules quagga», est actuellement en cours de construction au lac de Bienne (<https://www.esb.ch/de/esb/projekte/erneuerung-seewasserwerk-ipsach/>)

Concernant les systèmes exploitant l'eau du lac à des fins de chauffage ou de refroidissement, il est crucial d'installer un échangeur de chaleur aussi proche que possible du lac. Cela nécessite deux conduites : l'une à l'intérieur du bâtiment ainsi thermorégulée et l'autre partant du plan d'eau et y revenant. Cette configuration empêche les moules quagga et leurs larves de coloniser les tuyaux et les équipements à l'intérieur des bâtiments. La conduite de prise d'eau doit toutefois être conçue pour être nettoyée régulièrement. Par exemple, l'université Cornell à Ithaca (New York) utilise depuis 2000 un tel système pour refroidir l'ensemble de son campus, bien qu'il ait été nécessaire de nettoyer plusieurs fois la conduite d'eau infestée par les moules quagga. Cela démontre qu'il existe des solutions

techniques, mais elles doivent être mises en place avant que les moules quagga ne causent des dommages irréversibles aux infrastructures.

Les problèmes décrits existent également pour les prélèvements d'eau dans des cours d'eau infestés. Cependant, les rapports actuels d'installations situées sur le Rhin et l'Aar suggèrent que les dommages aux équipements sont beaucoup moins graves lorsqu'il s'agit de prélèvements d'eau dans des rivières que dans des lacs.

6 Concept de monitoring

6.1 Concepts

6.1.1 Détection précoce / recensement de la présence la moule Quagga au moyen de l'ADNe

En général, on suppose qu'il y a déjà beaucoup de moules quagga dans un lac avant que le premier spécimen ne soit découvert. Par exemple, la première moule quagga trouvée dans le lac de Zoug mesurait déjà presque 2 cm et était âgée de plus d'un an. Cela s'est produit peu de temps après que les premiers échantillons d'ADNe se soient révélés positifs. De même, dans le lac de Constance, la première moule a été découverte par hasard par un plongeur. Quelques mois après cette première découverte, des moules quagga ont été trouvées à divers endroits du lac, montrant ainsi que cette espèce était déjà présente dans plusieurs zones du lac. Étant donné qu'il existe des populations de moules zébrées dans pratiquement tous les lacs suisses, il serait très coûteux de rechercher régulièrement des moules quagga dans les échantillons provenant de lacs non infestés.

À l'époque des premières découvertes dans les eaux suisses (2016), il n'existait pas encore de programmes de détection précoce spécifiques pour les moules quagga. Pour détecter précocement l'infestation d'un plan d'eau par les moules quagga (ou d'autres néobiotes aquatiques), des méthodes appropriées doivent être utilisées de manière ciblée et efficace:

- Méthodes génétiques : analyse de l'ADN environnemental (ADNe) ou d'échantillons mixtes
- Examens réguliers d'échantillons de plancton (larves de moules)
- Examens réguliers d'échantillons du littoral ou des sédiments lacustres (échantillons de moules)

Une approche efficace pour déterminer la présence éventuelle de moules quagga dans un plan d'eau repose sur des méthodes génétiques. Tous les organismes libèrent de l'ADN (ADN environnemental, ADNe) dans leur environnement, qui peut être identifié de manière spécifique à l'espèce dans des échantillons d'eau ou de sédiment. Toutefois, même avec cette méthode, une certaine concentration d'organismes est nécessaire pour la détection ; un résultat négatif ne signifie donc pas que l'organisme recherché est absent (Pawlowski et al. 2020).

Le matériel de base pour une analyse ADNe peut être un échantillon d'eau, idéalement plusieurs échantillons provenant de différentes zones du plan d'eau. Une autre méthode pour détecter la présence de moules quagga dans un plan d'eau consiste à analyser l'ADN d'un échantillon mixte d'organismes. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de trouver et d'identifier morphologiquement l'organisme cible, puisqu'il peut être détecté par analyse génétique.

La détection précoce d'une infestation d'un plan d'eau par les moules quagga est cruciale pour limiter l'ampleur des dommages économiques et prévenir leur propagation. D'après les connaissances actuelles, les dommages écologiques ne peuvent être réduits ni réparés une fois que la moule quagga s'est établie. Une fois la présence de moules quagga confirmée dans un lac, des exemples de lacs déjà touchés montrent qu'il ne faut que quelques années pour que des problèmes apparaissent, par exemple au niveau des infrastructures d'approvisionnement en eau.

En ce qui concerne le recensement de la présence de la quagga au moyen de l'ADNe, différentes approches peuvent être suivies pour les moules quagga :

1. Surveillance de l'ADNe dans des échantillons mixtes à l'aide d'un filet à plancton

Objectif : détecter les larves de la moule quagga dans un plan d'eau.

Avantage : Pourrait éventuellement être intégré dans le programme de monitoring des cantons, les échantillons peuvent être archivés dans de l'éthanol à 99% et analysés ultérieurement.

Méthode :

- Traction verticale avec filet à plancton de 40 µm
- Prélèvement d'échantillons au moins tous les 3 mois souhaitable (plusieurs fois par an essentiel)
- Possibilité d'échantillonner de grandes quantités d'eau
- Détection de larves de quagga dans le plancton recensé
- Extraction d'ADN à partir d'un échantillon de plancton capturé pour détecter l'ADN de la moule quagga (test ciblé / comparaison d'ADN)

Un autre avantage de l'échantillonnage à l'aide d'un filet à plancton est qu'il s'agit déjà d'un échantillon intégré. Cependant, il est recommandé de prélever au moins deux échantillons par site, par date et par lac. Si l'échantillonnage est combiné avec un suivi régulier du plancton dans un lac, cela permettra d'obtenir de nombreux échantillons tout au long de l'année. Au minimum, deux points de collecte par an devraient être analysés. Si un échantillon s'avère positif, il est conseillé d'analyser également un « échantillon back-up » ainsi que d'autres échantillons archivés.

2. Monitoring ADNe dans des échantillons d'eau ou de sédiments

Objectif : détecter l'ADN libéré dans l'eau par les adultes et les larves de la moule quagga.

Avantage: Prélèvement simple et peu coûteux

Méthode : les échantillons environnementaux peuvent comprendre des échantillons d'eau et/ou de sédiments.

- Les prélèvements d'échantillons d'eau doivent être effectués (a) pendant les périodes de forte activité biologique (reproduction ; par exemple en été) et (b) dans les zones de plan d'eau présentant un potentiel élevé de colonisation.
- Prélèvement de petites quantités de sédiments suffisantes pour l'extraction de l'ADNe : des restes d'organismes s'accumulent dans les sédiments. Il s'agit d'une sorte « d'échantillon cumulatif », ou d'archives collectées sur une longue période. L'inconvénient est que le prélèvement de ces échantillons nécessite un équipement spécial et qu'il est difficile de standardiser la procédure.

Dans l'idéal, les résultats sont transmis aux cantons ainsi qu'à un « centre de compétence pour la moule quagga » (voir chapitre 7).

Les défis actuels liés aux méthodes mentionnées concernent principalement le manque de standardisation, le manque d'expérience des commanditaires et/ou des utilisateurs de ces méthodes, ainsi que l'absence de normes de qualité établies. Un travail en conditions stériles et le recours à des laboratoires hautement spécialisés (externes) sont nécessaires, notamment en raison de la faible quantité d'ADN disponible. Il est généralement recommandé de préparer deux échantillons par analyse: un pour l'analyse principale et un autre comme échantillon de réserve. En cas de détection positive de moules quagga, l'échantillon de réserve est analysé par un second laboratoire. Si le résultat est à nouveau positif, on peut considérer avec un très haut degré de certitude que le plan d'eau est infesté par les moules quagga.

En Suisse, il existe actuellement peu de laboratoires capables de réaliser de manière fiable des tests ADN pour la détection des moules quagga. De plus, ces laboratoires manquent actuellement de contrôles de qualité. Ces derniers pourraient être mis en place par une instance indépendante (par exemple, au niveau fédéral), en introduisant des tests en double aveugle (Ringversuche), où les laboratoires seraient tenus de démontrer leur capacité à distinguer des échantillons positifs de moules quagga des échantillons témoins négatifs.

6.1.2 Surveillance à long terme des lacs infestés par la moule quagga

Sitôt qu'un lac est colonisé par les moules quagga, il est impossible de les éradiquer. Cependant, on ne sait pas encore comment ces moules se propagent dans les lacs préalpains suisses ni quelles sont leurs conséquences sur l'écosystème aquatique. Pour les gestionnaires de lacs, il est crucial de savoir si, comment et à quelle vitesse les moules quagga se répandent dans un lac (en termes de nombre et de biomasse) et à quelle profondeur elles s'installent. Grâce à ces données, combinées avec des mesures de suivi régulières, il est possible de faire des prédictions sur les impacts des moules quagga sur les écosystèmes et les services écosystémiques en Suisse. Ces prédictions seront d'autant plus précises si les données de suivi provenant de différents lacs sont combinées et analysées conjointement. Des demandes régulières adressées à l'Eawag concernant les impacts concrets et les dommages témoignent de la nécessité de telles analyses. Cette mission devrait être assumée par une entité supra-cantonale.

Il est recommandé d'étudier les plans d'eau concernés en utilisant les mêmes méthodes déjà appliquées dans les lacs de Constance, Léman, Bienne et les lacs tessinois. Chaque site d'échantillonnage doit être analysé trois fois par prélèvement à l'aide du grappin à sédiments « Ponar » et du Benthic Imaging System (BIS; Karatayev et al. 2021a). Les méthodes de suivi sont détaillées en Annexe 1. Nous proposons de classer les lacs en deux catégories pour le suivi des moules quagga :

- « Lacs de recherche » : Ces lacs doivent être échantillonnés régulièrement à divers endroits et à toutes les profondeurs. Les données à long terme obtenues serviront à estimer les impacts des moules quagga sur les grands plans d'eau préalpains. Cette catégorie inclut le lac de Constance, le Léman et les lacs tessinois (lac de Lugano, lac Majeur). Ces lacs internationaux font déjà l'objet d'études approfondies depuis plusieurs années, coordonnées par les commissions internationales IGKB, CIPEL et CIPAI. Tous ces lacs ont déjà été étudiés une ou plusieurs fois pour la présence de moules quagga. Nous recommandons de poursuivre ce suivi de manière coordonnée. Par ailleurs, il serait utile de surveiller régulièrement un lac eutrophe colonisé par les moules quagga, car il manque des données sur leur développement dans de tels environnements. Le lac de Zoug serait un candidat approprié.
- « Tous les autres lacs colonisés par les moules quagga » : Dans ces lacs, un suivi annuel minimal devrait être réalisé sur le même transect (5 à 6 sites, depuis le rivage jusqu'à la zone la plus profonde). Des tests menés dans le cadre d'un projet, en collaboration avec des représentants cantonaux au lac de Neuchâtel et au lac de Zurich, ont démontré que les cantons auront besoin d'un soutien initial pour un échantillonnage efficace (cf. extrait du rapport intermédiaire pour l'OFEV du 23.11.2023; Annexe 2). Une certaine pratique est nécessaire pour maîtriser les équipements d'échantillonnage, mais en principe, ce suivi annuel peut être réalisé en 1 à 2 jours maximum par lac. Le matériel

d'échantillonnage peut être emprunté à l'Eawag et doit être utilisé avec un navire approprié (équipé d'une grue, d'un treuil et d'un câble). Nous suggérons que le soutien technique temporaire requis soit fourni par une « centre de compétence pour la moule quagga ». Cette approche garantirait également la comparabilité des données collectées.

6.1.3 Citizen Science (notifications de la population)

Le public nous informe régulièrement de la découverte potentielle de moules quagga, bien qu'il s'agisse souvent de moules zébrées. La plupart du temps, des photos sont envoyées à l'Eawag, aux cantons ou à d'autres personnes qui apparaissent dans le public en relation avec des moules quagga. Ces messages du public sont très importants et doivent être encouragés. Nous recommandons (comme pour le [moustique tigre - structure de signalement](#)) :

1. Directives centrales pour la collecte, la documentation (photos, localisation GPS) et l'envoi des moules collectées.
2. Une adresse centrale pour la Suisse où ces moules peuvent être envoyées et évaluées (centre de compétence pour la moule quagga, éventuellement en collaboration avec infofauna/InfoSpecies et une « InvasivApp » pour les néobiotes aquatiques).
3. Si les cantons reçoivent des demandes/échantillons, ils devraient prendre contact avec le centre de compétence pour la moule quagga.
4. Les retours d'information devraient être rapides et les autorités cantonales devraient toujours être informées des résultats positifs ou négatifs.
5. Les données sont introduites dans une « base de données quagga » centrale, soit en collaboration avec les centres de données nationaux InfoSpecies, soit elles sont transmises à ces derniers.

6.2 Monitoring et communication

Les cantons devraient également préparer une stratégie pour informer le public si les analyses d'ADNe révèlent et confirment qu'un lac supplémentaire est infesté de moules quagga. Actuellement, le public est très intéressé par ce sujet. A notre avis, en cas de résultats positifs répétés d'ADNe de moules quagga, il faudrait d'abord prélever des échantillons avec un grappin à sédiments Ponar (voir aussi 6.1.2) dans la zone littorale du lac à plusieurs endroits. Il est également possible de procéder à des analyses en plongée. Si les analyses ne révèlent pas la présence de moules quagga, nous recommandons d'en informer tout de même le public. Bien entendu, les prélèvements d'ADNe et de Ponar dans un tel lac devraient être répétés régulièrement (au moins tous les 6 mois).

7 Conclusion et perspectives

La question des moules quagga continuera de préoccuper la Suisse au cours des prochaines décennies. Il est à craindre qu'un cours d'eau nouvellement infesté de moules quagga soit régulièrement découvert. Le présent rapport, qui propose des recommandations pour les mesures de prévention et de monitoring, vise à apporter un soutien en ce sens. Plus tôt l'action sera prise, mieux ce sera. Comme nous l'avons déjà souligné, chaque année où l'invasion de la moule quagga est retardée dans un cours d'eau est une année gagnée.

Notre projet a également mis en évidence un besoin important d'information et de soutien centralisés pour la mise en œuvre des mesures de prévention, de gestion et de surveillance, tant de la part des cantons que d'autres acteurs, tels que les distributeurs d'eau potable et d'autres acteurs locaux. Nous estimons donc qu'il est nécessaire de créer temporairement un centre de compétence pour la moule quagga, afin de soutenir tous ces acteurs. Une description plus détaillée de ce service figure ci-dessous.

Actuellement, il n'existe aucune mesure coordonnée à l'échelle nationale pour surveiller la présence de la moule quagga et empêcher sa propagation. De nombreux cantons ont mis en place des mesures de prévention et de protection sous forme de sensibilisation et/ou d'introduction de l'obligation de nettoyage des bateaux, ou d'autres interdictions et obligations. Toutefois, l'effet serait bien plus important si la ou les bases juridiques supportant ces mesures étaient créées, et si ces mesures étaient mises en œuvre et coordonnées à l'échelle nationale (y compris, dans la mesure du possible, pour les eaux internationales).

Nous recommandons également de mieux évaluer l'efficacité des mesures mises en place. Pour ce faire, et afin de pouvoir prédire les conséquences de la propagation de la moule quagga, il est nécessaire de disposer de données de surveillance fiables.

Nous sommes convaincus que la coordination centrale de toutes ces mesures nécessite une approche cohérente. Il n'est pas possible d'attendre la mise en œuvre complète de la « Stratégie de la Suisse contre les espèces exotiques envahissantes ». Nous considérons qu'un « centre de compétence pour la moule quagga », en collaboration avec la Confédération et les cantons (par exemple via le Cercle Exotique), constitue la meilleure solution. Idéalement, ce service pourrait être localisé à l'Eawag. Il serait pertinent d'examiner la possibilité de l'intégrer à l'une des plateformes existantes (Agenda 21 pour l'eau ou VSA-Plateforme Qualité des eaux). Dans l'immédiat, nous estimons que les tâches de ce service devraient être les suivantes :

- Coordination et point de contact pour les mesures de prévention et de protection, y compris l'évaluation des mesures, collaboration avec le Cercle Exotique
- Coordination et point de contact pour la science citoyenne et les déclarations de moules quagga
- Soutien à la détection précoce : pour les lacs où la présence de la moule quagga n'a pas été détectée, un monitoring régulier de l'ADNe devrait être mis en place. Ce monitoring doit également être coordonné afin que les méthodes et les résultats soient comparables. Ces données devraient également être préparées dans une base de données pour la Confédération et les cantons.
- Monitoring des « Lacs de recherche » pour évaluer l'évolution à long terme et les effets concrets pour les eaux suisses.
- Soutien au monitoring des cantons : tous les autres lacs abritant des populations de moules quagga devraient être échantillonnés une fois par an avec relativement peu de moyens (1 à 2 jours par an). L'objectif est qu'une grande partie du travail soit effectuée par les cantons, mais le service spécialisé apporte son soutien pour le concept d'échantillonnage, pour les échantillonnages eux-mêmes et aide également à l'évaluation et à la mise à disposition des données collectées pour la Confédération et les cantons.
- Soutien en cas de nouvelles découvertes : Il est à craindre que tous les lacs non encore touchés ne restent pas exempts de moules quagga à long terme. C'est pourquoi il faudrait discuter au préalable avec les cantons de la procédure à suivre lorsque des moules quagga sont trouvées dans un lac. Notre recommandation est que les cantons partagent immédiatement de telles informations, mais bien entendu de manière confidentielle, avec le centre de compétence pour la moule quagga. C'est auprès de ce service que toutes les informations devraient être rassemblées.

Un tel service pourrait être mis en place dans un premier temps pour une durée limitée (par ex. 3 ans). Pendant cette période, il faudrait travailler à une solution durable en collaboration avec les cantons (Cercle Exotique).

Malgré les nombreux défis posés par l'invasion de la moule quagga, celle-ci offre également, en tant que « qu'espèce phare », des opportunités d'empêcher ou de retarder la propagation d'autres néobiotes problématiques. C'est aussi pour cette raison que la sensibilisation générale aux néobiotes aquatiques entamée par la moule zébrée devrait être soutenue et poursuivie par tous les acteurs concernés et avec le slogan 'Chaque expérience et action gagnée contre les espèces envahissantes compte'.

8 Bibliographie

8.1 Littérature générale

- Aldridge, D. C., P. Elliott, and G. D. Moggridge. 2006. Microencapsulated BioBullets for the Control of Biofouling Zebra Mussels. *Environmental Science & Technology* **40**:975-979.
- AUE. 2019. Pilotprojekt Bootsreinigung Massnahme gegen die Verschleppung invasiver Neozoen aus dem Rhein in andere Gewässer. Amt für Umwelt und Energie, Kanton Basel-Stadt, Abteilung Gewässerschutz.
- Baer, J., C. Spiessl, and A. Brinker. 2022. Size matters? Species- and size-specific fish predation on recently established invasive quagga mussels *Dreissena rostriformis bugensis* Andrusov 1897 in a large, deep oligotrophic lake. *Journal of Fish Biology*.
- Biodiversitätskonvention: Übereinkommen über die Biologische Vielfalt. 1995. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1995/1408_1408_1408/de.
- Burlakova, L. E., A. Y. Karatayev, D. Boltovskoy, and N. M. Correa. 2023. Ecosystem services provided by the exotic bivalves *Dreissena polymorpha*, *D. rostriformis bugensis*, and *Limnoperna fortunei*. *Hydrobiologia* **850**:2811-2854.
- Carlton, J. T. 1993. Dispersal Mechanisms of the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*). Pages 677-697 in T. F. Nalepa and D. W. Schloesser, editors. *Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Colautti, R. I., S. A. Bailey, C. D. A. van Overdijk, K. Amundsen, and H. J. MacIsaac. 2006. Characterised and Projected Costs of Nonindigenous Species in Canada. *Biological Invasions* **8**:45-59.
- De Ventura, L., K. Kopp, K. Seppälä, and J. Jokela. 2017. Tracing the quagga mussel invasion along the Rhine river system using eDNA markers: early detection and surveillance of invasive zebra and quagga mussels. *Management of Biological Invasions* **8**:101-112.
- De Ventura, L., N. Weissert, R. Tobias, K. Kopp, and J. Jokela. 2016. Overland transport of recreational boats as a spreading vector of zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Biological Invasions*:1-16.
- Durán, C., M. Lanao, L. Pérez y Pérez, C. Chica, A. Anadón, and V. Touya. 2012. Estimación de los costes de la invasión del mejillón cebra en la cuenca del Ebro (periodo 2005-2009).
- Elwell, L. C., and S. Phillips. 2021. Uniform Minimum Protocols and Standards for Watercraft Inspection and Decontamination Programs for Dreissenid Mussels in the Western United States. https://westernregionalpanel.org/wp-content/uploads/2022/08/UMPSIV_Report2021_Final.pdf.
- Great Lakes Commission. 2018. Invasive Mussel Collaborative: <https://invasivemusselcollaborative.net/>.
- Hammond, D., and G. Ferris. 2019. Low doses of EarthTec QZ ionic copper used in effort to eradicate quagga mussels from an entire Pennsylvania lake. *Management of Biological Invasions* **10**:500-516.
- Haubrock, P. J., R. N. Cuthbert, A. Sundermann, C. Diagne, M. Golivets, and F. Courchamp. 2021. Economic costs of invasive species in Germany. *NeoBiota* **67**:225-246.
- Johnson, L. E., and J. T. Carlton. 1996. Post-establishment spread in large-scale invasions: dispersal mechanisms of the zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Ecology* **77**:1686-1690.
- Karatayev, A. Y., and L. E. Burlakova. 2022. What we know and don't know about the invasive zebra (*Dreissena polymorpha*) and quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels. *Hydrobiologia*:1-74.
- Karatayev, A. Y., L. E. Burlakova, S. E. Mastitsky, and D. K. Padilla. 2015. Predicting the spread of aquatic invaders: insight from 200 years of invasion by zebra mussels. *Ecological Applications* **25**:430-440.
- Karatayev, A. Y., L. E. Burlakova, K. Mehler, A. K. Elgin, L. G. Rudstam, J. M. Watkins, and M. Wick. 2022. Dreissena in Lake Ontario 30 years post-invasion. *Journal of Great Lakes Research*.
- Karatayev, A. Y., L. E. Burlakova, K. Mehler, E. K. Hinchey, M. Wick, M. Bakowska, and N. Mrozinska. 2021a. Rapid assessment of *Dreissena* population in Lake Erie using underwater videography. *Hydrobiologia*.
- Karatayev, A. Y., L. E. Burlakova, D. K. Padilla, and L. E. Johnson. 2003. Patterns of spread of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha* (Pallas)): the continuing invasion of Belarussian lakes. *Biological Invasions* **5**:213-221.
- Karatayev, A. Y., V. A. Karatayev, L. E. Burlakova, K. Mehler, M. D. Rowe, A. K. Elgin, and T. F. Nalepa. 2021b. Lake morphometry determines *Dreissena* invasion dynamics. *Biological Invasions* **23**:2489-2514.
- Karatayev, A. Y., D. K. Padilla, D. Minchin, D. Boltovskoy, and L. E. Burlakova. 2006. Changes in Global Economies and Trade: the Potential Spread of Exotic Freshwater Bivalves. *Biological Invasions* **9**:161-180.
- Kraemer, B. M., S. Boudet, L. E. Burlakova, L. Haltiner, B. W. Ibelings, A. Y. Karatayev, V. A. Karatayev, S. Rossbacher, R. Stöckli, D. Straile, and P. Spaak. 2023. An abundant future for quagga mussels in deep European lakes. *Environmental Research Letters* **18**.
- Pawlowski, J., L. Apothéoz-Perret-Gentil, E. Mächler, and F. Altermatt. 2020. Anwendung von eDNA-Methoden in biologischen Untersuchungen und bei der biologischen Bewertung von aquatischen Ökosystemen. Richtlinien. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2010: 77 S.
- Pires, L. M. D. 2005. Grazing for clarity: Zebra mussels as a potential tool in biomanipulation of lakes. Radboud Universiteit Nijmegen.
- Pollux, B., G. Velde, and A. Vaate. 2010. A perspective on global spread of *Dreissena polymorpha*: a review on possibilities and limitations. Page 479 in G. van der Velde, S. Rajagopal, and A. bij de Vaate, editors. *The Zebra Mussel in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden.

- Ricciardi, A., R. Serrouya, and F. G. Whoriskey. 1995. Aerial exposure tolerance of zebra and quagga mussels (Bivalvia: Dreissenidae): implications for overland dispersal. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **52**:470-477.
- Van Eerden, M. R., and J. J. de Leeuw. 2010. How *Dreissena* sets the winter scene for water birds: dynamic interactions between diving ducks and zebra mussels. Van der Velde G, Rajagopal S, bij de Vaate A. The Zebra Mussel in Europe. Backhuys Publishers, The Netherlands:251-264.

8.2 Littérature du thème spécifique «Vecteurs»

- Banha, F., I. Gimeno, M. Lanao, V. Touya, C. Durán, M. A. Peribáñez, and P. M. Anastácio. 2015. The role of waterfowl and fishing gear on zebra mussel larvae dispersal. *Biological Invasions* **18**:115-125.
- Carlton, J. T. 1993. Dispersal Mechanisms of the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*). Pages 677-697 in T. F. Nalepa and D. W. Schloesser, editors. *Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Coughlan, N. E., A. L. Stevens, T. C. Kelly, J. T. A. Dick, and M. A. K. Jansen. 2017. Zoochorous dispersal of freshwater bivalves: an overlooked vector in biological invasions? *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*.
- De Ventura, L., N. Weissert, R. Tobias, K. Kopp, and J. Jokela. 2016. Overland transport of recreational boats as a spreading vector of zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Biological Invasions*:1-16.
- Johnson, L. E., and J. T. Carlton. 1996. Post-establishment spread in large-scale invasions: dispersal mechanisms of the zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Ecology* **77**:1686-1690.
- Johnson, L. E., A. Ricciardi, and J. T. Carlton. 2001. Overland Dispersal of Aquatic Invasive Species: A Risk Assessment of Transient Recreational Boating. *Ecological Applications* **11**:1789-1799.
- Karatayev, A. Y., and L. E. Burlakova. 2022. What we know and don't know about the invasive zebra (*Dreissena polymorpha*) and quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels. *Hydrobiologia*:1-74.
- Karatayev, A. Y., L. E. Burlakova, D. K. Padilla, and L. E. Johnson. 2003. Patterns of spread of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha* (Pallas)): the continuing invasion of Belarussian lakes. *Biological Invasions* **5**:213-221.
- Karatayev, A. Y., D. K. Padilla, D. Minchin, D. Boltovskoy, and L. E. Burlakova. 2006. Changes in Global Economies and Trade: the Potential Spread of Exotic Freshwater Bivalves. *Biological Invasions* **9**:161-180.

9 Informations complémentaires

- [Obligation de déclaration et de nettoyage pour les bateaux, ZCH](#)
- [Obligation de déclaration et de nettoyage pour les bateaux Ct. BE](#)
- [Nettoyage obligatoire du lac de Hallwil Canton d'AG](#)
- [Ct. ZG Interdiction de mise à l'eau pour les bateaux extracantonaux](#)
- [Ct. ZH Zone de protection du Pfäffikersee contre les néobiotes](#)
- [Commune d'Oberägeri, ZG: barrière empêchant le mouillage de bateaux non-Zougois](#)
- [Inspections des bateaux au lac Tahoe](#)
- <https://www.timeschronicle.ca/pulling-the-plug-on-aquatic-invasive-species/>
- [Informations complémentaires sur les méthodes de monitoring BIS et Ponar \(site web de l'Eawag\)](#)

10 Annexes

10.1 SOPs pour le monitoring à long terme dans les lacs infestés (Eawag 2024)

10.2 Extrait du rapport intermédiaire pour l'OFEV du 23.11.2023