

ÉVALUATION DE LA DISTRIBUTION ET DE LA STRUCTURE DES POPULATIONS DE MOULES ZÉBRÉES AU LAC MEMPHRÉMAGOG ET SES ENVIRONS



JANVIER 2020

PARTENAIRES



455, rue MacDonald
Magog (Québec) J1X 1M2
Tél. : 819 843-9292

Courriel : info@mrcmemphremagog.com



845 Sherbrooke Street West,
Montréal (Québec), H3A 0G4
Tél. : 514 398-4455

**Forêts, Faune
et Parcs**



Direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de
Montréal, de la Montérégie et de Laval
800, rue Goretti
Sherbrooke (Québec), J1E 3H4
Tél. : 819 820-3883



7, rue Principale Est
Magog (Québec) J1X 1Y4
Tél. : 819 843-3333



**MEMPHRÉMAGOG
CONSERVATION INC.**

51, rue Cabana
Magog (Québec) J1X 2C4
Tél. : 819 620-3939

Courriel : info@memphremagog.org



**BLEU • EVERBLUE
MASSAWIPPI**

C.P. 2703
North Hatley (Québec) J0B 2C0
Tél. : 819 238-4410

Courriel : bleumassawippi@lacmassawippi.ca



124, rue Wellington Nord, bureau 100
Sherbrooke (Québec) J1H 5H9
Tél. : 819 821-5656

PARTENAIRES FINANCIERS



**Pêches et Océans
Canada**

**Fisheries and Oceans
Canada**



Programme de formation FONCER du CRSNG en écologie lacustre et fluviale
NSERC CREATE training program in Lake and Fluvial Ecology



INFORMATIONS GÉNÉRALES

Coordination du projet

Geneviève D'Avignon, MSc. Biologie
Courriel : gen.davignon@mail.mcgill.ca
Tél. : 438 828-4517

Anthony Ricciardi, professeur agrégé
Courriel : tony.ricciardi@mcgill.ca
Tél. : 514 398-4089

Recherche et collecte de données

Équipe McGill

Jasmin Bourgault, BSc. Biologie
Lorena Vidal, étudiante au Baccalauréat en
biologie

Équipe Bleu Massawippi

Vincent Lemieux, coordonnateur Bleu
Massawippi
Catherine Robin

Équipe MCI

Vicki Marcoux, BSc.Env
Eric Phendler, étudiant au Baccalauréat en
biologie
Virginie Lepage, BSc. Biologie
Maxime Veillette, BSc. Biologie

Analyse des données et rédaction

Sophia Hsu, BSc. Biologie (analyse des données et rédaction)
Alexandre Baud, candidat au doctorat (cartographie)

Partenaires :

Mélanie Desautels, coordonnatrice au développement durable, MRC de Memphrémagog
Ariane Orjik, directrice générale, Memphrémagog Conservation Inc.
Solveig Landry, technicienne en environnement, ville de Magog
Marie-Josée Goulet, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Nathalie Perron, agente de projets, ville de Sherbrooke
Michèle Gérin, directrice générale, Bleu Massawippi
Denis Mongeau, Plongée Magog

Bénévole :

Jean-Marc Gaudreau

Références à citer :

Le Protocole d'évaluation de la distribution, de la densité et de retrait de moules zébrées :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). 2019. Protocole d'évaluation de la distribution, de la densité et de retrait de moules zébrées (Dreissena polymorpha). Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Québec. 4 p. et annexes.

Pour citer ce travail, les figures, tableaux, les autres protocoles ou bases de données:

D'Avignon, G., Bourgault, J., Hsu, S., et Ricciardi, A. 2020. Évaluation de la distribution et de la structure des populations de moule zébrées au lac Memphrémagog et ses environs.

Pour les crédits photo : Geneviève D'Avignon

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes et tous les partenaires ayant permis la réalisation de cette étude. Tout d'abord, nous voulons remercier les employés de la MRC de Memphrémagog de nous avoir choisis pour mener cette recherche et d'avoir fourni l'assistance financière pour la réalisation des étapes du projet; un merci spécial à Mélanie Desautels pour son soutien et ses conseils. Nous tenons aussi à souligner l'aide que nous avons reçue du personnel de Memphrémagog Conservation Inc. qui nous a accompagnés avec enthousiasme lors de certaines journées d'échantillonnage et pour avoir fourni une embarcation motorisée pour l'échantillonnage : Vicki Marcoux, Eric Phendler, Virginie Lepage et Ariane Orjikh. Nous souhaitons également remercier l'équipe de Bleu Massawippi, Vincent Lemieux, Catherine Robin et les bénévoles qui nous ont accompagnés sur le terrain, ainsi que le Collège Massawippi qui nous a hébergés. Nous souhaitons remercier le personnel impliqué du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, en particulier Marie-Josée Goulet, et de la Ville de Magog, Solveig Landry. Nous souhaitons également remercier Denis Mongeau de Plongée Magog de nous avoir accompagnés lors des activités en plongée et avoir partagé son expertise. Nous remercions Jean-Marc Gaudreau pour ses photos, ses rapports d'observation de moules et pour avoir participé aux collectes de moules. Nous avons également reçu l'appui des municipalités d'Austin, du Canton de Potton, de la Ville de Magog, de la Ville de Sherbrooke, du Domaine des Villas de l'Anse et des résidents de la rue de la Presqu'île pour nous avoir donné accès aux terrains et au lac. Nous souhaitons également souligner le travail effectué par tous les partenaires et le soutien offert par le laboratoire de recherche d'Anthony Ricciardi de McGill pour le prêt d'équipements et la supervision des démarches. Finalement, nous souhaitons remercier les familles D'Avignon et Colbert d'avoir offert l'hébergement et le transport à l'équipe de recherche.

Nous souhaitons que ce travail permette de fournir un premier portrait de l'invasion du lac par la moule zébrée et nous autorisons que les résultats, les protocoles et les données de ce projet soient partagés avec les intervenants et les personnes qui le désirent.

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

L'introduction d'espèces envahissantes nuisibles est un phénomène mondial qui met en danger plusieurs espèces animales ainsi que leurs écosystèmes. La moule zébrée (*Dreissena polymorpha*) est une espèce exotique envahissante introduite dans les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent au milieu des années 80. Depuis, elle a envahi plus d'une cinquantaine de lacs et de rivières en Ontario, au Québec et aux États-Unis. La cause principale de la propagation de la moule zébrée entre les différents plans d'eau est le transport terrestre sur les embarcations à moteurs et leurs remorques. Une fois installée, il est quasi impossible de déloger cette espèce qui cause des problèmes écologiques et socio-économiques importants. Par exemple, elle augmente la clarté de l'eau par son action filtrante très efficace, réduisant la quantité de nourriture disponible et changeant les conditions essentielles pour l'alimentation ou la reproduction de certaines espèces de poissons. Elle colonise également les structures humaines, les embarcations, les systèmes hydrauliques, les bouées, les piliers, les conduits, les quais, les barrages hydroélectriques et les prises d'eau potable. Leur présence sur ces structures engendre des coûts importants. Au Québec, peu de données spécifiques à la moule zébrée sont disponibles, mais il est estimé que les coûts varient entre une cinquantaine et centaine de milliers de dollars à l'échelle de la province par année pour la décontamination et la restauration de la fonctionnalité des structures infestées.

Les mesures préventives instaurées en Estrie ont protégé les lacs et les rivières de l'invasion de la moule zébrée pendant une vingtaine d'années. Cependant, la découverte de cette moule dans le lac Memphrémagog en 2017 nous force à revoir les méthodes de prévention et la capacité de cette espèce à survivre dans un milieu peu favorable. Depuis son apparition, le nombre de sites envahis augmente annuellement et des individus ont été détectés dans la rivière et le lac Magog. Il s'agit d'une occasion unique d'étudier la façon dont la moule colonise et prolifère, mais aussi de faire état de la situation en début d'invasion. Au cours de l'été 2019, une équipe de chercheurs de l'Université McGill, en collaboration avec la MRC de Memphrémagog, la Ville de Magog et le Memphrémagog Conservation Inc. ont effectué des inventaires de moules zébrées en apnée et en plongée pour évaluer l'ampleur de l'envahissement du lac Memphrémagog et de ses effluents afin d'établir le statut de la population. Ce rapport vise à présenter les résultats de l'étude et à fournir des pistes de solutions visant à établir des priorités quant à l'élaboration d'un plan de gestion et de contrôle de cette espèce exotique envahissante dans la région.

Pour l’instant, les populations du lac Memphrémagog et du lac Magog en sont encore à leur début, car la densité de colonisation est faible avec une moyenne inférieure à 1 moule par mètre carré sur l’ensemble des sites. La majorité des moules inventoriées sont relativement grandes (entre 20 et 30 mm) et se retrouvent surtout sur un substrat solide. Bien que l’on observe la colonisation des mulettes indigènes par les moules zébrées, leur densité n’est pas encore suffisamment grande pour affecter leur survie ni transformer les conditions du lac de manière significative. En comparant la structure de la population échantillonnée en 2019 avec celle de 2018, on constate depuis cet été la présence de deux tranches d’âge distincte; soit la population initiale, installée en 2018 ou avant, et des individus provenant d’une nouvelle génération (de jeunes moules de l’année). Ceci indique que malgré les conditions sous-optimales du lac pour la moule, celle-ci est bien présente et se reproduit localement.

On retrouve des moules zébrées dans le lac Memphrémagog, dans la rivière Magog ainsi qu’au lac Magog. Ces plans d’eau peuvent devenir une population source pour la contamination des autres plans d’eau de la région. Les embarcations et les activités nautiques se tenant durant la période de reproduction des moules, soit entre juin et septembre, peuvent servir de source pour la propagation de la moule. Nous suggérons de revoir les pratiques de nettoyage des embarcations et de repenser les accès aux cours d’eau afin qu’ils soient bien surveillés. La prévention est le meilleur outil contre l’invasion de la moule. Pour cette raison, nous encourageons fortement les municipalités, MRC et villes de la région de l’Estrie à se prémunir de politiques et règlements sévères et à les appliquer pour protéger les cours d’eau non infestés de la région, dont le lac Massawippi. Ces mesures doivent être implantées partout pour être efficaces. Nous vous encourageons à continuer la sensibilisation des usagers avec la participation de partenaires engagés. Maintenant que le lac Memphrémagog est une source de moules zébrées, la seule façon d’éliminer tous les risques de contaminations est de contrôler l’accès aux plans d’eau vulnérables afin de les protéger. Idéalement, il faudrait aussi restreindre aux plaisanciers qui visitent le lac Memphrémagog (incluant la rivière Magog et le lac Magog) l’accès aux autres cours d’eau non infestés durant une même saison ou d’exiger une inspection de l’embarcation et de ses équipements (remorque, moteur, équipement de pêche, etc.) à chaque point d’entrée aux lacs et rivières.

Les activités de collecte manuelle nous ont permis de récolter 4 497 moules en trois événements de collecte par 20 personnes pour une durée de sept heures de travail sur le terrain. Ces activités offrent une opportunité d’impliquer les citoyens et de les former à reconnaître la moule, mais ne peuvent à elles seules éradiquer la population de moules zébrées à l’échelle du lac. Nous recommandons de revisiter les

zones de collecte au cours de l'été 2020 afin d'évaluer le taux de recolonisation des moules après une tentative de contrôle. En comparant les densités de 2019 et 2020, il sera possible d'évaluer l'efficacité de cette méthode pour contrôler la population à des sites ciblés.

Si cette espèce continue à se disperser et que sa population continue de croître, des transformations majeures pourront être observées. D'un point de vue écologique, la présence croissante de moules transformera les conditions physico-chimiques de l'eau, modifiera la dynamique et la composition des espèces, dont les communautés de poissons, et accroîtra la présence de plantes aquatiques émergentes. D'un point de vue économique, l'augmentation des densités de moules zébrées peut engendrer des coûts de nettoyage et de gestion importants. Par exemple, les conduits d'eau potable et les barrages hydroélectriques seront colonisés, ce qui réduira leur efficacité. Les plages sablonneuses du lac deviendront parsemées de moules aux coquilles coupantes, ce qui diminuera l'attrait touristique. Finalement, les changements écologiques du lac peuvent aussi nuire aux espèces de poissons convoités pour les activités de pêche sportive. Pour surveiller la progression et l'étalement de la population de moules zébrées dans le lac Memphrémagog et ses environs, nous recommandons d'effectuer un suivi de la population de moules zébrées en partenariat avec des universités, des instances gouvernementales et des organismes locaux afin de déterminer le moment des périodes de reproduction et d'évaluer le taux de croissance et de survie des véligères jusqu'à l'âge adulte. Il est également envisageable d'effectuer une étude de risques d'impacts pour les plans d'eau de la région afin de mieux cibler les interventions.

TABLE DES MATIÈRES

Partenaires.....	2
Informations générales.....	3
Remerciements.....	5
Résumé exécutif.....	6
1. Mise en contexte.....	12
2. Objectifs.....	15
3. Descriptions des sites d'étude.....	15
3.1. Lac Memphrémagog et ses effluents.....	15
3.2. Lac Massawippi.....	16
4. Méthodes d'inventaire.....	16
4.1. Étude de densité de moules et mulettes.....	16
4.2. Recherche active pour la détection de la présence de moules zébrées.....	17
4.3. Prélèvement des paramètres physico-chimiques.....	17
5. Portrait de l'invasion de la moule zébrée.....	18
5.1. Distribution de la population.....	18
5.2. Densité de moules et mulettes.....	20
5.3. Structure de la population.....	24
5.4. Effet des facteurs environnementaux sur la colonisation des moules zébrées.....	29
5.5. Taux de calcium.....	33
5.6. Autres paramètres physico-chimiques.....	35
6. Contrôle des colonies de moules zébrées au lac Memphrémagog.....	35
7. Évaluation du recrutement des moules zébrées (substrats artificiels et végétaux).....	37
8. Prévisions.....	39
9. Recommandations générales.....	42
9.1. Plan d'intervention contre les EEEs.....	42
9.2. Détection et suivi des populations.....	43
9.3. Réviser la réglementation selon le niveau d'intervention souhaité.....	44
9.4. Intégrer la décontamination des embarcations et de l'équipement nautique à la pratique d'activités aquatiques et assurer la qualité des inspections.....	45
9.5. Sensibilisation des usagers et des citoyens riverains.....	46
9.6. S'entourer de partenaires locaux pour des interventions ciblées.....	47
9.7. Lac Massawippi et autres plans d'eau non contaminés.....	47
9.8. Rivière et lac Magog.....	47
9.9. Autres recommandations.....	48
10. Références.....	50

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Recommandations pour prévenir l'introduction de moules zébrées dans le lac Memphrémagog

Annexe 2 : Protocole d'évaluation de la distribution, de la densité et de retrait de moules zébrées

Annexe 3 : Catalogue de substrats

Annexe 4 : Protocole de prélèvement et décompte des substrats artificiels

Annexe 5 : Base de données du projet

Annexe 6 : Photographies prise dans le cadre de l'étude

Annexe 7 : Caractérisation du lac Massawippi

Annexe 8 : Base de données pour les substrats artificiels

TABLE DES FIGURES

Cartes

Carte 1 : Sites d'échantillonnage été 2019	18
Carte 2 : Carte démontrant la taille moyenne du substrat estimé selon le calcul de valeur phi pour chaque site échantillonné.	32
Carte 3 : Concentrations moyennes du taux de calcium dans le lac Memphrémagog entre juin et août 2019.	35

Tableaux

Tableau 1 Résumé des décomptes de moules zébrées selon la méthode d'inventaire utilisée à l'été 2019.	21
Tableau 2 Moyenne de la densité de moules zébrées.....	22
Tableau 3 Moyenne de la densité de mulettes.	24
Tableau 4 Classification de la taille du substrat utilisé sur le terrain et de la valeur phi attribué.....	31
Tableau 5 Effet des facteurs environnementaux sur la colonisation de la moule zébrée au lac Memphrémagog.....	33
Tableau 6 Résumé des taux de calcium nécessaire à la survie, au développement et à la reproduction de la moule zébrée.	33
Tableau 7 Résumé du dénombrement de moules juvéniles sur les substrats artificiels récoltés en 2019.	39

Figure

Figure 1 : Structure de la population de moules zébrées à chaque site de densité prélevé entre juin et juillet 2019.....	26
Figure 2 : Structure des populations de moules zébrées dans la Baie de Magog selon les prélèvements effectués le 13 et 14 août 2019.....	27
Figure 3 : Structure de la population de moules zébrées aux îles des Trois Sœurs au cours de l'été 2019.	28
Figure 4 : Structure des populations de moules zébrées au lac Memphrémagog en 2018 et 2019 et au lac Magog en 2019.....	30
Figure 5 : Relation entre le taux de mortalité des mulettes en fonction du rapport massique moules zébrées et mulettes.	40
Figure 6 : Densité de moules zébrées dénombrées annuellement depuis leur apparition dans le haut de la rivière Mississippi entre 1992 et 1996.....	41

1. MISE EN CONTEXTE

Les milieux aquatiques sont particulièrement vulnérables à l'introduction de nouvelles espèces, car il existe une multitude de mécanismes d'introduction qui sont eux-mêmes peu [1] ou difficiles à réglementer. Les conséquences des invasions par les espèces exotiques sont généralement difficiles à prévoir [2], mais bien souvent, ces introductions sont nuisibles. Les espèces exotiques modifient l'habitat récepteur et les réseaux trophiques associés [3, 4], elles compétitionnent avec les espèces indigènes menant souvent à leur extinction [5, 6]. Elles perturbent les infrastructures humaines et les activités récréotouristiques [7-9] et engendrent ainsi des coûts importants autant pour leur détection, leur gestion, leur contrôle que pour leur prévention [10]. En effet, on estime que les coûts associés aux dommages et au contrôle des espèces exotiques envahissantes (EEE) aquatiques au Canada sont d'environ 7,5 milliards de dollars, dont 200 millions de dollars américains investis annuellement dans la région des Grands Lacs (MFFP, 2019).

Les espèces exotiques deviennent envahissantes dans un nouvel environnement lorsque leurs caractéristiques écologiques leur permettent de se reproduire rapidement, de survivre hors de leur milieu naturel pour une période de temps leur permettant d'être transportées ou déplacées vers un milieu adéquat et lorsqu'elles résistent aux maladies ou prédateurs du milieu. La majorité des EEEs ont une étonnante capacité à résister aux changements de conditions abruptes. Elles s'intègrent donc plus rapidement et plus facilement à des milieux perturbés par les activités humaines ou les changements climatiques [11, 12]. La moule zébrée est une espèce exotique envahissante très connue, car une fois introduite dans les lacs et les rivières de l'Amérique du Nord, elle a créé d'énormes perturbations [13]. Sa capacité de filtration très élevée lui permet de consommer le seston (plancton dans la colonne d'eau) plus rapidement que les espèces natives. Ceci a pour effet de réduire la quantité de nourriture disponible pour le développement des poissons et des invertébrés en plus d'augmenter la pénétration de la lumière dans l'eau transformant ainsi l'habitat. Les plantes aquatiques se retrouvent favorisées ce qui accroît leur quantité [14]. Ces changements altèrent le transfert d'énergie entre les organismes au sein de la chaîne alimentaire [15]. Les espèces indigènes sont vulnérables à l'arrivée de la moule, car elles n'ont pas évolué en présence d'espèces semblables et ne sont pas adaptées à ces changements. Finalement, les moules ont la capacité de concentrer les virus et autres contaminants [16] et peuvent devenir un vecteur de maladies pour un large éventail d'espèces de mammifères et d'oiseaux [17].

La moule zébrée (*Dreissena polymorpha*) (Palas, 1771) est un bivalve rayé en forme d'amande de taille généralement entre 25 et 35 mm de longueur et originaire des mers Noire, Caspienne et Aral. La construction de canaux de navigation aux 18^e et 19^e siècles a permis son expansion rapide sur le territoire européen [18]. Au milieu des années 1980, la moule zébrée a été introduite dans le bassin versant des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent [19], très probablement par le rejet des eaux de ballast des navires transocéaniques [20]. Depuis, on la retrouve dans plus d'une cinquantaine de lacs et de rivières en Ontario, au Québec et aux États-Unis, dont les Grands Lacs, le réseau hydrographique du fleuve Saint-Laurent, au lac Champlain et dans les rivières Richelieu, Hudson, Mississippi, Ohio et Tennessee. Une fois introduite dans un milieu, la moule peut se reproduire dès sa première année de vie, mais contrairement aux bivalves indigènes, cette moule ne vit que 3 ou 4 ans. En plus de se reproduire rapidement, elle est très prolifique, une femelle adulte pouvant produire plus d'un million d'œufs par saison de frai (de mai à octobre). La reproduction des moules est possible lorsque la température de l'eau grimpe au-delà de 12 °C [21]. Une fois hors de l'œuf, la larve, aussi nommée véligère, peut se déplacer librement dans la colonne d'eau. En suivant les courants, elle peut se déplacer pendant plusieurs semaines avant de trouver un milieu propice pour s'installer.

Le succès d'établissement de la majorité des espèces introduites est attribuable aux activités humaines [2] et c'est aussi le cas pour la moule zébrée. Les moules du genre *Dreissena*, dont la moule zébrée et la moule quagga, ressemblent davantage aux moules marines. En effet, elles produisent des filaments adhésifs, nommés byssus, leur permettant de s'attacher à presque tous les objets solides disponibles dans leur environnement. La production de byssus est possible dans des eaux entre 10 °C et 20 °C [22], ce qui coïncide avec la période durant laquelle les activités nautiques récréatives sont les plus fréquentes. En effet, ces moules peuvent s'accrocher à la coque ou à la remorque d'un bateau de plaisance, à l'équipement de pêche ou tout équipement utilisé pour la pratique d'activité nautique ou subaquatique. Elles peuvent également s'accrocher aux plantes aquatiques qui, à leur tour, peuvent se prendre dans l'hélice des moteurs ou remorques des embarcations durant leurs déplacements [23-25]. De plus, elles peuvent survivre entre 3 à 18 jours hors de l'eau selon le taux d'humidité dans l'air [26]. Ainsi, les moules peuvent être accidentellement capturées et déplacées d'un plan d'eau à un autre très rapidement et sur de grandes distances. On croit que c'est par ce mécanisme que ces moules se dispersent entre les lacs et les rivières. Plusieurs introductions répétées d'un petit nombre d'individus, des véligères ou des adultes, ont une plus grande chance de mener à l'établissement d'une population dans un nouvel environnement que si la fréquence d'introduction est faible, mais qu'un plus grand nombre d'individus

sont introduits à la fois [27]. Ceci porte à croire que la présence de quelques moules seulement sur quelques embarcations ou matériaux contaminés peut contribuer à de nouvelles colonies.

Les coûts de gestion peuvent être extrêmement variables selon l'approche choisie, le nombre de structure à gérer, la taille et les activités reliées aux plans d'eau [7, 10]. Aux États-Unis, on estime les coûts de gestion liés aux moules zébrées et quaggas à 1 milliard de dollars américains par année [28]. La majorité des coûts proviennent des activités de sensibilisation, de prévention, de contrôle et de traitement pour limiter la colonisation des infrastructures humaines. Les activités de contrôle et de traitement sont principalement réalisées dans les stations de production hydroélectrique et dans les stations de traitement des eaux. Une étude a été menée entre 1990 et 2004 auprès des stations de traitement des eaux et des stations de production hydroélectrique afin d'évaluer l'impact économique engendré par la présence de moules zébrées dans les plans d'eau de l'Amérique du Nord. Selon cette étude, environ 36 % des installations ont subi des pertes économiques et 91 % des infrastructures situées sur des plans d'eaux contaminés ont utilisé des méthodes de contrôle ou d'atténuation pour éliminer ou contrôler les moules zébrées. Cette étude estime que les coûts de gestion annuels sont d'environ 30 000 \$ par installation[7].

À la suite des invasions du fleuve Saint-Laurent, Dr Anthony Ricciardi et Dr Joseph Rasmussen, chercheurs experts sur les EEEs de l'Université McGill, ont émis 8 recommandations pour prévenir l'introduction de moules zébrées dans le lac Memphrémagog (annexe 1). Basées sur ces recommandations, certaines mesures préventives, dont le nettoyage des embarcations et le contrôle des accès au lac, ont été instaurées par les municipalités bordant le lac Memphrémagog (voir le règlement municipal concernant les nuisances et visant à prévenir l'infestation des moules zébrées). Malgré l'application de ces mesures et le fait que les eaux du lac Memphrémagog sont considérées peu propices à leur survie due, entre autres, au faible taux de calcium, des moules zébrées ont été découvertes dans le lac en 2017. L'établissement de cette espèce dans le lac Memphrémagog a été confirmé en 2018. De faibles densités de moules ont été rapportées, soit entre 0 à 5 individus par mètre carré [29]. Quelques observations ont également été enregistrées dans le lac Magog, en aval du lac Memphrémagog, mais aucune densité de population n'a été enregistrée pour ce lac. Le lac Memphrémagog a échappé pendant une vingtaine d'années à l'invasion de la moule zébrée, mais il faut maintenant revoir les méthodes de prévention et la capacité de cette espèce à survivre dans un tel milieu. Ainsi, lors d'une rencontre entre la MRC de Memphrémagog, la Ville de Magog, la Ville de Sherbrooke, les municipalités bordant le lac Memphrémagog, le Memphrémagog Conservation inc., Bleu Massawippi et le ministère des Forêts, de la

Faune et des Parcs (MFFP), trois actions principales ont été identifiées comme prioritaires pour l'été 2019 afin de mieux connaître la situation et ainsi tenter de réduire les dommages potentiels que l'infestation par cette EEE peut causer à l'économie locale, à la qualité esthétique et fonctionnelle des infrastructures municipales et à l'écologie du lac et de ses effluents.

2. OBJECTIFS

Le **premier objectif** est de dresser un portrait de la situation de l'infestation de la moule zébrée au lac Memphrémagog et aux cours d'eau environnants (rivière Magog, lac Magog et lac Massawippi). Pour ce faire, nous avons effectué une étude de terrain pour acquérir des connaissances sur les populations de moules zébrées et documenter l'ampleur de l'envahissement. Nous avons également identifié les facteurs environnementaux (conditions physico-chimiques, substrats, présence de mulettes) qui influencent la colonisation des moules zébrées en début d'infestation. **Deuxièmement**, avec la participation de citoyens, nous avons effectué le contrôle des populations de moules zébrées au lac Memphrémagog. **Finalement**, nous avons effectué un suivi de l'établissement et du dispersément des moules zébrées au stade de végétère par la collecte d'eau (équipe du Vermont) et le recensement par substrats artificiels.

3. DESCRIPTIONS DES SITES D'ÉTUDE

3.1. Lac Memphrémagog et ses effluents

Le lac Memphrémagog est un lac glaciaire d'eau douce d'une longueur de 40 km, étroit (1 à 4 km) et profond (<107 m). Il est situé entre Newport, aux États-Unis, et Magog, au Québec [30]. Le lac a trois bassins distincts; celui du centre étant le plus profond. Près de 70 % du bassin versant du lac est drainé par trois rivières au sud qui fournissent l'apport primaire de nutriments au lac. Le bassin versant du Memphrémagog s'étend sur plus de 1 780 km², mais moins d'un tiers est situé au Québec. Le lac Memphrémagog recueille du phosphore, des sédiments et d'autres polluants, principalement par les ruissellements agricoles [31]. Ce lac est particulièrement important dans la région de l'Estrie parce qu'il fournit de l'eau potable à plus de 175 000 personnes. Le lac se déverse dans la rivière Magog dont le débit est contrôlé par quatre barrages hydroélectriques. Ces barrages produisent deux réservoirs, le lac Magog situé après le barrage de la Grande-Dame et le lac des Nations situé au cœur de la Ville de Sherbrooke (MELCC, 2018). Situé dans la province géologique des Appalaches, le lac Magog est un lac d'eau douce

moins profond (max.: 18,85 m) avec un bassin versant couvrant 1 764 km² et composé principalement de roches sédimentaires, d'ardoises et de grès.

3.2. Lac Massawippi

Le lac Massawippi est un lac oligomésotrophe bordé par les villages d'Ayer's Cliff et de North Hatley dans les Cantons de l'Est, au Québec. Le bassin versant du lac Massawippi s'étend sur une superficie de 620 km², dont la majorité est située au sud du lac. Près de 15 % de la superficie du bassin versant se trouve dans l'état du Vermont aux États-Unis. Le principal tributaire du lac est la rivière Tomifobia et son exutoire est la rivière Massawippi. Le lac Massawippi est utilisé comme réservoir d'eau potable par trois municipalités de la région [32, 33].

4. MÉTHODES D'INVENTAIRE

4.1. Étude de densité de moules et mulettes

Nous avons effectué un inventaire spécifique visant à déterminer le taux de colonisation et la structure des populations de moules zébrées du lac Memphrémagog, de la rivière Magog et du lac Magog. Nous avons établi une liste d'une quarantaine de sites potentiels en sélectionnant des zones uniformément réparties spatialement le long de ces cours d'eau et englobant un large éventail de caractéristiques environnementales. Au cours de l'été, 16 de ces sites ont été échantillonnés pour l'étude de densité réalisée entre le 16 juin et le 21 août 2019. Cinq transects de dix mètres de long ont été placés parallèlement au rivage aux isobathes de 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m et 2,5 m. Ensuite, cinq quadrats en PVC de 0,25 m² ont été placés le long de la ligne de transect (par exemple à 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m). Le substrat naturel contenu à l'intérieur des quadrats a été retourné avec précaution pour examiner toutes les surfaces que les moules peuvent coloniser. Cette technique permet de trouver et d'identifier visuellement des moules aussi petites que 2 mm de long. Les transects effectués en eau peu profonde ont été examinés en apnée tandis que les sites de plus d'un mètre de profondeur ont été inventoriés en plongée. Les spécimens trouvés ont tous été ramenés à la surface, identifiés et mesurés. La longueur de la coquille et le poids humide ont été mesurés pour chaque individu à l'aide d'un pied à coulisse numérique et d'une balance numérique. Toutes les mulettes indigènes de la famille des *Unionidae* présentes dans le quadrat ont également été échantillonnées de la même façon. Contrairement aux moules, les mulettes ont été soigneusement replacées là où elles ont été trouvées une fois les mesures effectuées. Nous avons

également noté la présence de moules zébrées sur les mulettes et mesuré le poids humide avec et sans la moule. Le protocole détaillé se trouve à l'annexe 2.

4.2. Recherche active pour la détection de la présence de moules zébrées

Pour couvrir une plus grande superficie et avoir une meilleure idée de la distribution des moules dans le lac Memphrémagog, le lac Magog, la rivière Magog et le lac Massawippi, nous avons aussi opté pour la réalisation d'inventaires par la recherche active en apnée et sans l'usage de transect ni quadrat. Cette technique peut être effectuée plus rapidement, mais elle est moins précise. À chaque site, une période d'une heure de recherche active par observation visuelle des structures humaines, géologiques ou du substrat propice à la colonisation par la moule zébrée a été effectuée. Toutes les moules observées ont été amassées et rapportées en laboratoire pour être mesurées et pesées. Les points GPS au départ et à la fin de la zone inventoriée ont été prélevés pour établir une estimation de la surface couverte. Une description de chaque site a été effectuée en notant principalement la composition du substrat et la présence de plantes aquatiques. Des photos ont été prises à chaque site à l'aide d'une caméra sous-marine pour créer un catalogue de référence pour chacun des sites. À l'aide de cette méthode, 28 sites ont été échantillonnés dans le réseau du lac Memphrémagog, entre le 26 juillet et le 26 août 2019, et 43 sites au lac Massawippi ont été inspectés entre le 19 et 29 août 2019. Le protocole d'inventaire (annexe 2) et la base de données (annexe 5) donnent plus de détails.

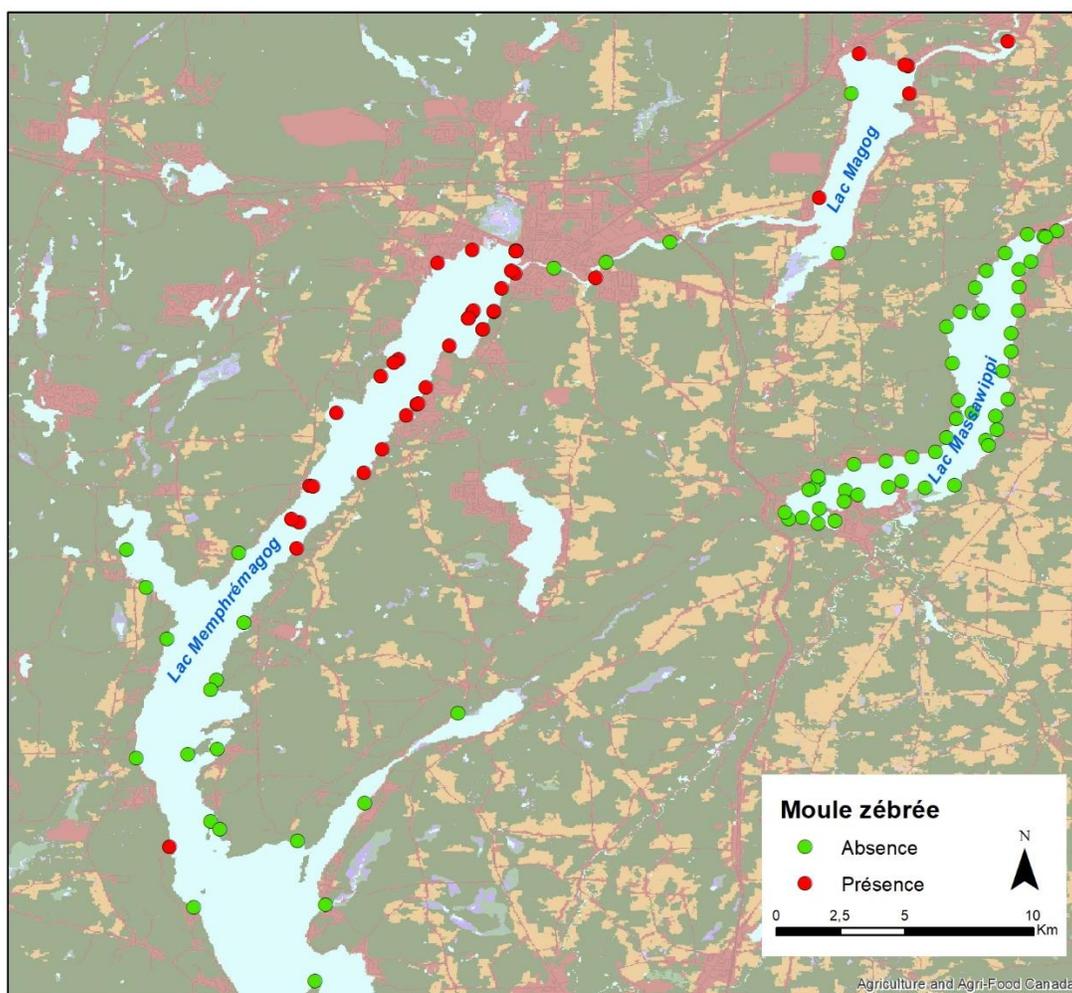
4.3. Prélèvement des paramètres physico-chimiques

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé une sonde multiparamètres YSI Pro Solo pour mesurer la température, la conductivité spécifique et l'oxygène organique dissous de l'eau à chaque site d'échantillonnage. Pour déterminer la concentration de calcium, un échantillon d'un litre d'eau a été prélevé et analysé en laboratoire à chaque site de densité. Le taux de calcium de ces échantillons a été mesuré à l'aide d'une sonde de calcium (Ca^{2+}) à électrode sélective combinée Cole-Parmer® (ISE) montée sur le compteur Oakton ion 6+. Les résultats obtenus ont été validés en mesurant la dureté calcique de l'eau (CaCO_3) à l'aide d'un ensemble de titrage de LaMotte. Finalement, les échantillons d'eau prélevés dans les tributaires ont, pour leur part, été analysés par le laboratoire Environex qui a utilisé un spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS), Perkin Elmer Sciex, Elan DRC II.

5. PORTRAIT DE L'INVASION DE LA MOULE ZÉBRÉE

5.1. Distribution de la population

En combinant tous les inventaires effectués au Lac Memphrémagog, à la rivière Magog et le Lac Magog au cours de l'été 2019, nous avons découvert la présence de moules zébrées à 27 sites distincts. La Carte 1 : Sites d'échantillonnage été 2019 Carte 1, illustre les sites inventoriés entre le 18 juin et le 26 août 2019. Les sites où la présence de moule zébrée a été observée sont indiqués en rouge. Le **Tableau 1** résume le nombre de moules collectés, la densité de moule (nombre par mètre carré et biomasse totale par mètre carré) et le taux de colonisation des moules indigènes par les moules zébrées (voir aussi l'annexe 5).



Carte 1 : Sites d'échantillonnage été 2019

Illustration des sites d'échantillonnages au Lac Memphrémagog, Lac Massawippi et le Lac Magog. La couleur du symbole indique la présence (rouge) ou l'absence (vert) de moule zébrée.

On retrouve principalement les moules zébrées dans le secteur nord du lac Memphrémagog. Des moules juvéniles et quelques adultes se retrouvent tout le long de la rivière Magog et même au-delà des barrages hydroélectriques suggérant que ceux-ci ne sont pas une barrière efficace au déplacement des larves. D'ailleurs, un plongeur de la région, Jean-Marc Gaudreau, a observé des moules zébrées sur le mur du barrage de la Grande-Dame (**Photo 1**) ainsi qu'à quelques endroits le long de la rivière Magog. Les trois sites inventoriés au lac Magog révèlent également la présence d'une population dans ce lac. La majorité des individus ont été observés vers l'exécutoire du lac, à la plage municipale dans le secteur Deauville de la Ville de Sherbrooke. Nos inventaires ont été principalement effectués près du rivage à une profondeur maximale de 3 m. Nous avons également remarqué la présence de moules jusqu'à 8 m de profondeur près de la deuxième île des Trois Sœurs. Il est donc possible qu'il y ait des moules zébrées à une telle profondeur à d'autres endroits également. Quant au lac Massawippi, aucune moule zébrée n'a été observée. Il est essentiel de poursuivre la surveillance de ce lac, car le substrat principal du côté ouest est composé de gravier, de galets et de roches de toutes tailles, ce qui permettrait à la moule de coloniser rapidement ce lac si elle y est introduite. Les données sont résumées à l'annexe 7.

Des densités plus importantes de moules zébrées ont été constatées autour des îles des Trois Sœurs et de l'île à l'Aigle ainsi que dans la baie de l'Anse et la baie de Magog. Il s'agit d'endroits assez achalandés en matière d'activités nautiques et récréatives. Nous avons croisé des plongeurs, des pêcheurs et plusieurs plaisanciers à chacun de ces endroits tout au long de l'été. Le modèle de distribution des moules indique que la majorité des moules zébrées ont d'abord été introduites au lac Memphrémagog, probablement à la suite de quelques introductions par le biais d'embarcations ou d'équipements contaminés. Nous avons remarqué que malgré la présence de stations de nettoyage aux accès publics, il est possible d'accéder au lac sans certificat d'usager ou de lavage. En effet, le personnel contrôlant les accès publics n'est pas en présent toute la journée et laisse passer quelquefois les individus sans vérifier leurs certificats. De plus, certains accès sont situés sur des lieux privés et non supervisés. Il est fort possible que certaines embarcations aient échappé aux inspections. Cependant, la dispersion et la colonisation de nouveaux sites est probablement le résultat du déplacement des véligères à l'aide des courants du lac ou aux bateaux et autres structures sur lesquels les véligères peuvent s'accrocher et être transportés d'un point à un autre.



Photo 1 : Mur du Barrage de la Grande-Dame, été 2019. ©Jean-Marc Gaudreau

5.2. Densité de moules et mulettes

L'étude de densité effectuée relève la présence de moules zébrées dans 11 des 16 sites échantillonnés dans le lac Memphrémagog, la rivière Magog et au lac Magog à une profondeur entre 0,5 à 2,5 mètres. Les densités moyennes en combinant tous les quadrats prélevés varient de 0,16 à 7,52 individus par mètre carré (**Tableau 2**), correspondant aux sites de la Baie de Cummins (valeur la plus faible) et la plage municipale de Deauville au lac Magog (densité la plus élevée). Plus il y a d'individus matures à un même endroit, plus le succès de reproduction risque d'être élevé. Les sites ayant les plus fortes densités ont davantage de chance de contribuer à la croissance de la population au sein d'un cours d'eau et de devenir une source de contamination pour les embarcations et les équipements utilisés à ces endroits. Ayant remarqué que le nombre de moules peut varier selon la profondeur et la distance du rivage, nous avons également mesuré les densités de moules pour chaque isobathe (une même profondeur). Dans ce cas, la densité la plus élevée se retrouve sur le rivage de l'île à l'Aigle où nous avons dénombré 14 individus par mètre carré à une profondeur de 1 mètre. Un nombre élevé de Dreissenidés, plus de 7 individus par mètre carré pour une même isobathe, a été enregistré sur les sites de la plage publique du lac Magog, à l'île à l'Aigle et aux îles Les Trois Sœurs au lac Memphrémagog. Moins de relevés ont été effectués au lac Magog en raison de l'accès limité à la rive, mais l'invasion a également été constatée dans la section nord du lac, probablement en raison de la direction du courant. En revanche, les sites sur la rivière Magog ont de très faibles densités de Dreissenidés avec une moyenne de 0,32 individu par mètre carré.

Tableau 1
Résumé des décomptes de moules zébrées
selon la méthode d'inventaire utilisée à l'été 2019.
Méthode d'inventaire : Densité (D), présence/absence (P/A), contrôle manuel (B), rapport d'observation (O).

Site	Méthode	Nombre de moules	Densité (m ²)	Biomasse (g/m ²)	% sur mulette
Île à l'Aigle	D	35	5,60	7,31	0
Manoir	D	13	2,08	4,10	17
Baie Cummins	D	1	0,16	0,29	0
Île Trois Sœurs (île 1 est)	D	25	4,00	6,14	1
Île Trois Sœurs (île 2 est)	D	11	1,76	1,79	1
Île Lord	D	2	0,32	0,32	100
Baie de l'Anse	D	14	2,24	3,74	0
Baie de Magog (étoile)	D	14	1,87	1,76	29
Fitch Bay	D	0	0,00	0,00	0
Pointe Cummins	D	20	3,20	4,82	60
Chemin Colby	D	0	0,00	0,00	0
Knowlton Landing	D	0	0,00	0,00	0
Bryant's Landing	P/A	2	s. o.	s. o.	0
Magog (condo)	P/A	51	0,07	0,07	0
Ruisseau Castle	P/A	14	0,00	0,01	22
Chérive	P/A	24	0,03	0,04	13
Snug Harbour	P/A	11	0,01	0,02	18
Evergreen	P/A	13	0,03	0,04	7
Cedar Lodge	P/A	13	0,65	0,91	69
Mansonville	P/A	0	0,00	0,00	0
Georgeville	P/A	0	0,00	0,00	0
Prise d'eau	P/A	16	0,02	0,41	0
Baie de Magog (étoile)	P/A	122	0,10	0,06	3
Chemin Montpetit	P/A	15	0,01	0,02	20
Baie de Magog (plage des Cantons)	P/A	21	0,02	0,03	95
Île de la Province	P/A	0	0,00	0,00	0
Manoir	P/A	5	1,00	1,88	0
Ruisseau Tompkin	P/A	0	0,00	0,00	0
Chemin des Huarts	P/A	0	s. o.	s. o.	0
Lime Kiln	P/A	0	s. o.	s. o.	0
Île Longue	P/A	0	0,00	0,00	0
Île Molson	P/A	0	0,00	0,00	0
Pointe Jewett	P/A	0	0,00	0,00	0
Château Jones	P/A	0	0,00	0,00	0
Baie de l'Abbaye	P/A	0	0,00	0,00	0
Marina Grand Boisé	P/A	0	0,00	0,00	0
Baie Mountain House	P/A	1	s. o.	s. o.	0
Île Trois Sœurs (île 2 est)	B	100	0,13	0,25	s. o.
Île Trois Sœurs (île 2 ouest)	B	3 756	6,26	10,28	0
Prise d'eau de Sherbrooke	B	641	2,14	1,09	9
Descente (riv. Magog)	D	0	0,00	0,00	s. o.
Moore (riv. Magog)	D	4	0,64	0,37	25
Centre Sportif (riv. Magog)	P/A	0	0,00	0,00	0
Parc canin (riv. Magog)	P/A	0	0,00	0,00	0
Barrage Dame (riv. Magog)	O	P	s. o.	s. o.	s. o.
Bournival (lac Magog)	P/A	7	0,23	0,15	43
Descente (lac Magog)	O	P	s. o.	s. o.	s. o.
Monseigneur-Vel (lac Magog)	D	0	0,00	0,00	0
Plage Deauville (lac Magog)	D	47	7,52	3,68	51

Tableau 2
Moyenne de la densité de moules zébrées.

Le nombre d'individus a été dénombré pour chaque quadrat et transformé en densité. Les valeurs du tableau pour chaque isobathe indiquent la densité moyenne des cinq quadrats prélevés le long de l'isobathe. Puis, la moyenne des densités de toutes les isobathes d'un même site est indiquée dans la colonne « Moyenne ». Les données ont été prélevées au lac Memphrémagog, à la rivière Magog et au lac Magog entre juin et juillet 2019.

Site	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	Moyenne
Île à l'Aigle	7,2	14,4	1,6	4,8	0	5,6
Baie de l'Anse	6,4	2,4	0	1,6	0,8	2,24
Baie Cummins	0	0,8	0	0	0	0,16
Pointe Cummins	2,4	1,6	3,2	3,2	5,6	3,2
Île Lord	0	0	0,8	0	0,8	0,32
Manoir	0	4	3,2	0,8	2,4	2,08
Moore (riv. Magog)	0,8	0,8	1,6	0	0	0,64
Île Trois Sœurs (île 1 est)	7,2	2,4	4	4,8	1,6	4
Île Trois Sœurs (île 2 est)	2,4	2,4	4	s. o.	s. o.	1,47
Baie de Magog (étoile)	7,2	0,8	3,2	0	0	3,73
Monseigneur-Vel (lac Magog)	0	0	0	0	0	0
Fitch Bay	0	0	0	0	0	0
Colby	0	0	0	0	0	0
Descente (riv. Magog)	0	0	0	0	0	0
Knowlton	0	0	0	0	0	0
Plage Deauville (lac Magog)	0	3,2	10,4	13,6	10,4	7,52

Dans l'ensemble, nous pouvons conclure que les deux lacs abritent de faibles densités de moules zébrées, car la densité la plus élevée est de 14 individus par mètre carré, une valeur nettement inférieure aux densités recensées dans des populations établies, comme au lac Mississippi où certaines populations ont 15 000 individus par mètre carré [34]. Cela suggère que le processus d'invasion n'en est encore qu'à ses débuts. De plus, les densités de moules zébrées sont très variables d'un site à l'autre, ce qui, selon Burlakova et ses collègues (2006), est une caractéristique de l'invasion précoce.

En général, des densités élevées ont été observées principalement dans les régions localisées au nord. Au lac Memphrémagog, ce sont les sites situés entre la baie de Magog et l'île à l'Aigle, incluant les îles Les Trois Sœurs et la prise d'eau potable de la Ville de Sherbrooke, qui démontrent les plus fortes densités. Au lac Magog, plus de moules ont été dénombrées à la plage municipale de Deauville. Nous soupçonnons que les facteurs hydrodynamiques ont une influence substantielle sur la concentration des densités. En effet, le courant circulant vers le nord dans les deux lacs peut entraîner des véligères, le stade de vie qui dépend de la dérive passive pour la dispersion [15], vers les secteurs situés au nord. Cette

hypothèse se trouve également appuyée par le fait que, Picard et Doyon, en 2018, n'ont trouvé que de très faibles densités de moules dans la partie centrale et aucune dans le secteur sud du lac Memphrémagog. Dans le cas de la rivière Magog, nous y avons retrouvé le plus faible taux de colonisation. Cela peut s'expliquer par la vitesse plus élevée de l'écoulement de la rivière, laquelle peut diminuer la capacité des végétaux à s'accrocher au substrat [35].

Nous avons inventorié près de 430 mulettes indigènes au lac Memphrémagog. Les données sur leurs tailles et leurs poids sont regroupées dans une base de données à l'annexe 5 et les photographies de chaque mulette sont présentées à l'annexe 6. Nous avons identifié la présence de quatre espèces de mulettes indigènes dans le lac Memphrémagog, le lac Magog et la rivière Magog, dont l'elliptio de l'Est (*Elliptio complanata*) qui représente plus de la moitié des espèces de mulettes récoltées. Près d'un tiers des individus sont des lampsiles rayées (*Lampsilis radiata*). Nous avons observé seulement quelques individus d'anodontes de l'Est (*Pyganodon cataracta*) et de lampsiles cordiformes (*Lampsilis cardium*). La densité moyenne de mulettes observée par site varie entre 0,8 à 30,4 individus par mètre carré (**Tableau 3**). Les plus grandes densités de mulette ont été observées à l'île Lord et à la pointe Cummins avec des densités de 15,2 et 9,6 individus par mètre carré respectivement. Les espèces dénombrées sont habituellement les plus résistantes à la colonisation par les moules zébrées. Ces populations locales ne devraient donc pas disparaître à cause de l'arrivée de la moule zébrée. Aucune mulette n'a pu être échantillonnée à Knowlton Landing et à l'île des Trois Sœurs (2^e île du côté est), à cause de problèmes logistiques. Aucune mulette vivante n'a été prélevée au lac Massawippi. Seules des photos sous-marines ont été prises (photo 2) et quelques coquilles vides ont été ramassées pour effectuer l'identification des mulettes en laboratoire. Nous avons identifié quatre espèces également soit l'elliptio de l'Est, la lampsile rayée, l'anodonte de l'Est et la grande anodonte (*Pyganodon grandis*). En plus des moules zébrées, nous avons remarqué la présence d'autres espèces envahissantes, dont la vivipare géorgienne (*Viviparus georgianus*) et le myriophylle à épis (*Myriophyllum spicatum*) aux lacs Memphrémagog, Magog et Massawippi.



Photo 2 : Mulettes indigènes observées au lac Massawippi.

Tableau 3
Moyenne de la densité de mulettes.

Le nombre d'individus a été dénombré pour chaque quadrat et transformé en densité. Les valeurs du tableau pour chaque isobathe indiquent la densité moyenne des cinq quadrats prélevés le long de l'isobathe. Puis, la moyenne des densités de toutes les isobathes d'un même site est indiquée dans la colonne « Moyenne ». Les données ont été prélevées au lac Memphrémagog, à la rivière Magog et au lac Magog entre juin et juillet 2019.

Site	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	Moyenne
Île à l'Aigle	0	0	0	0	0,8	0,16
Baie de l'Anse	0	0	0	12,4	0,8	2,4
Baie Cummins	0	0	0	0	0,8	0,16
Pointe Cummins	0	0,8	10,4	8	13,6	9,6
Île Lord	0	0	0	1,6	6,4	1,6
Manoir	0	0	0	4	3,2	1,44
Moore (riv. Magog)	0	3,2	0,8	1,6	0	1,12
Île Trois Sœurs (île 1 est)	0	0	0,8	0,8	0,8	0,48
Île Trois Sœurs (île 2 est)	s. o.					
Baie de Magog (étoile)	4	7,3	14	2	0	5,6
Monseigneur-Vel (lac Magog)	2,4	2,4	0	0	0	0,96
Fitch Bay	6,4	6,4	6,4	10,4	10,4	6,72
Colby	0	0	4,8	2,4	0	1,44
Descente (riv. Magog)	0	0	0	0	0	0
Knowlton	s. o.					
Plage Deauville (lac Magog)	0,8	7,2	26,4	70,4	39,2	34,9

5.3. Structure de la population

Pour mieux comprendre la colonisation de la moule aux divers endroits du plan d'eau, nous avons mesuré la taille et le poids de chacune des moules prélevées. Ces informations nous permettent de mieux comprendre le rythme de croissance des moules. En regroupant toutes les moules prélevées dans le lac Memphrémagog, nous observons deux groupes de tailles distinctes au sein des Dreissenidés : un groupe

d'individus juvénile, des jeunes de l'année mesurant entre 4 et 14 mm, et un groupe d'individus adultes de taille variant entre 18 et 30 mm (**Figure 3B**). En regroupant tous les individus prélevés au lac Magog, nous observons la dominance d'un seul groupe, soit des individus relativement petits mesurant de 5 à 20 mm de longueur (**Figure 3C**).

Bien qu'il puisse y avoir plusieurs périodes de reproduction au cours d'un été produisant ainsi différentes cohortes de moules zébrées, une longueur de 1 mm à 15 mm est habituellement reconnue pour correspondre aux individus juvéniles [36, 37]. Selon le plan d'eau, certaines moules deviennent adultes lorsqu'elles atteignent une taille variant entre 7 et 9 mm [38, 39]. Toutefois, en tenant compte des conditions du milieu et de la période à laquelle les prélèvements ont eu lieu, nous considérons qu'une taille de 10 mm constitue une bonne estimation pour indiquer la taille de moules juvéniles pour le lac Memphrémagog. Nous avons observé plusieurs individus de taille inférieure à 10 mm lors de nos collectes réalisées entre la mi-juin et la mi-juillet, ce qui suggère la présence de populations reproductrices dans le lac Memphrémagog et le lac Magog. La proportion d'individus de taille juvénile et adulte est présentée dans la **Figure 1**.

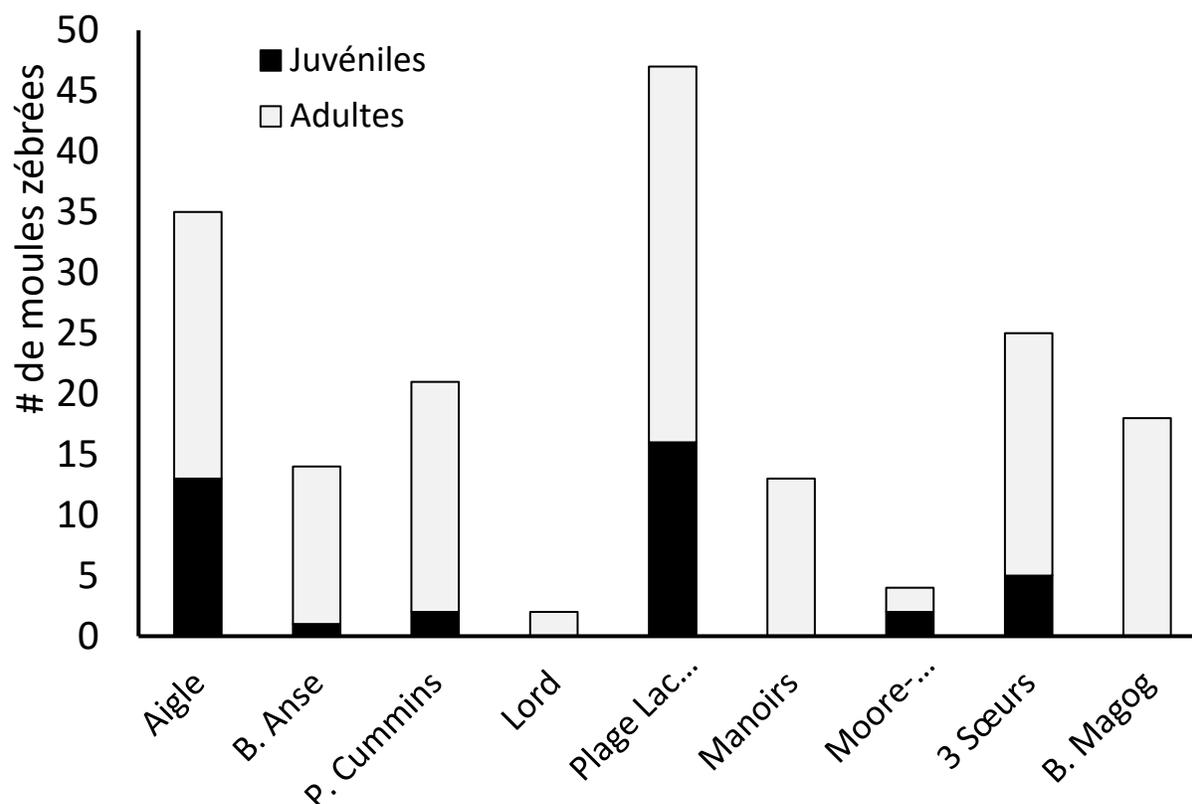


Figure 1 : Structure de la population de moules zébrées à chaque site de densité prélevé entre juin et juillet 2019.

Le nombre de moules juvéniles (taille inférieure à 10 mm) est indiqué en noir et le nombre de moules adultes est représenté en gris.

Contrairement aux moules juvéniles, qui n'étaient présentes que sur quelques sites, nous avons observé que les individus plus âgés (Dreissenidé d'une longueur de plus de 10 mm) étaient largement répartis dans tous les plans d'eau (**Figure 1**). Nous avons noté qu'une densité plus élevée d'adultes ne se traduit pas directement par une forte densité de juvéniles. Par exemple, les sites de la baie de l'Anse, de la pointe Cummins, de la rue des Manoirs et de l'île des Trois Sœurs présentent tous un faible nombre de jeunes malgré leurs densités plus élevées de moules adultes. Cela pourrait être attribuable aux différences dans les conditions environnementales ou aux différences entre les populations de moules zébrées elles-mêmes. Par exemple, nous avons échantillonné quatre sites dans la baie de Magog entre le 13 et 14 août et notons que la fréquence de juvéniles et d'adultes diffère (**Figure 2**). Ces différences sont probablement attribuées à la bathymétrie, au type de substrat (**Carte 2**), à la chimie de l'eau (**Carte 3**) et

à la direction du courant. Ces facteurs peuvent influencer la qualité du milieu et, conséquemment, la croissance des moules, leur reproduction et l'apport en végétaux.

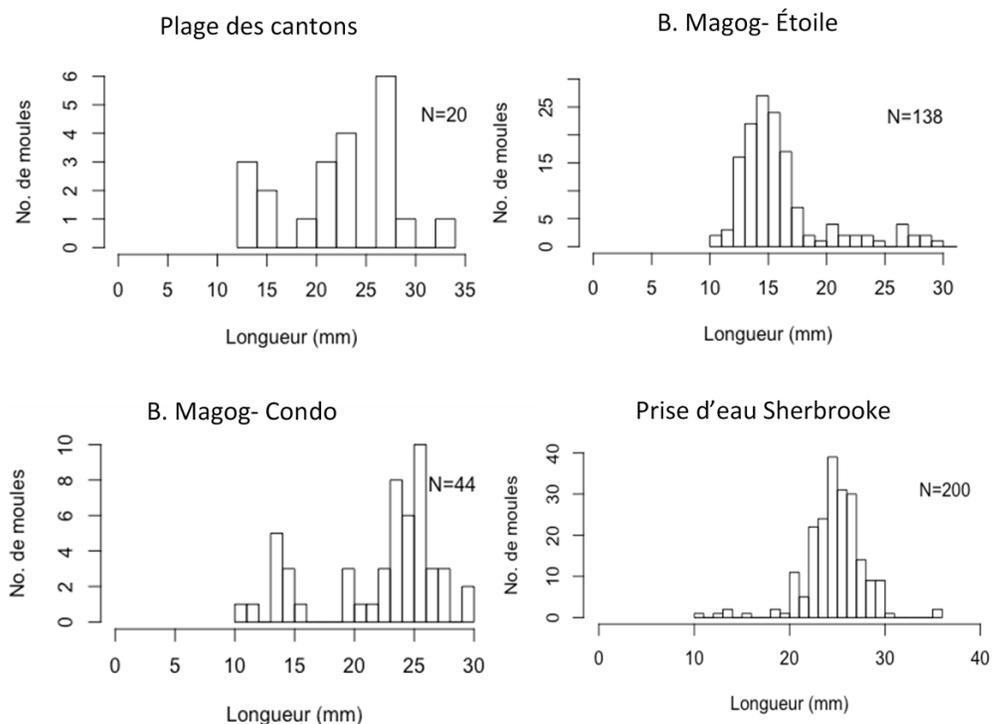


Figure 2 : Structure des populations de moules zébrées dans la Baie de Magog selon les prélèvements effectués le 13 et 14 août 2019.

La fréquence de moule par taille diffère d'un site à l'autre indiquant que chaque population est assujettie à des conditions différentes et à un apport différent en végétaux lors d'une même période de l'année.

De plus, une population dominée par des adultes peut indiquer un faible taux de reproduction avant la date de l'échantillonnage. Par exemple, nous avons effectué plusieurs collectes aux îles des Trois Sœurs au cours de l'été. Bien que la **Figure 3** démontre peu de moules juvéniles à la fin juillet, il y a une plus grande proportion de juvéniles en août. Il est donc possible qu'il y ait plusieurs événements de reproduction reproductifs au cours d'un été. Peu importe le nombre d'événements de reproduction, la présence de juvéniles près de l'île à l'Aigle, aux îles des Trois Sœurs et à la plage publique du lac Magog indique que ces populations peuvent se reproduire. Cependant, nous ne savons pas si d'autres sites ont une période de reproduction plus tardive ni si le taux de survie des juvéniles est élevé autrement dit, si toutes les moules juvéniles retrouvées atteignaient l'âge adulte.

Les adultes des populations provenant du lac Memphrémagog relâchent des végétaux dans la colonne d'eau et peuvent servir de population source colonisant des habitats situés en aval. Puisqu'il y

avait très peu de moules zébrées matures échantillonnées dans le lac Magog, nous pouvons soupçonner que l'invasion provient de la portion nord du lac Memphrémagog situé en amont. En d'autres termes, le lac Memphrémagog peut être une source de moules zébrées, distribuant par le biais des courants d'eau des véligères à la rivière Magog et au lac Magog situés en aval. Nous pouvons penser que le même effet se produira le long de la rivière Magog et les cours d'eau subséquents, comme la rivière Saint-François, si la population source devient très prolifique.

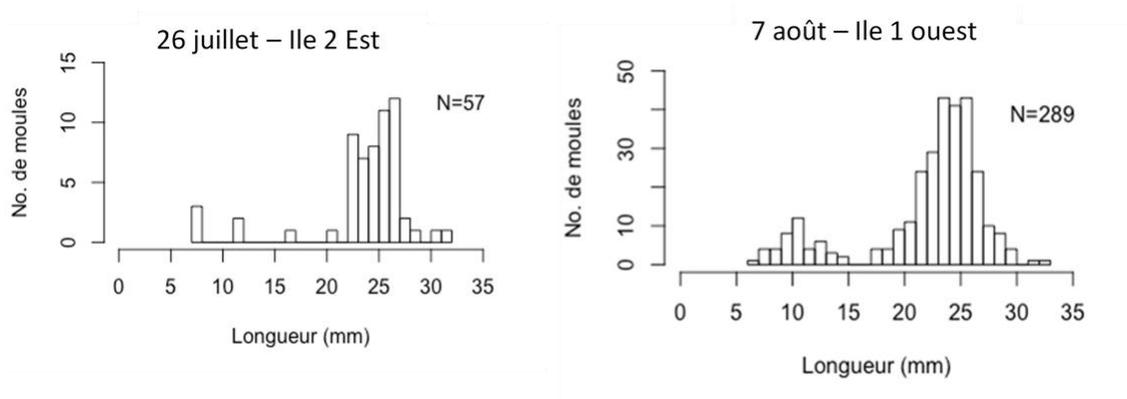


Figure 3 : Structure de la population de moules zébrées aux îles des Trois Sœurs au cours de l'été 2019.

La figure de gauche représente la distribution de la fréquence de moules par taille à l'île 2, côté est, lors de la collecte du 26 juillet 2019. Le graphique de droite correspond à la distribution de la fréquence de moules par taille à l'île 1, côté ouest, une semaine plus tard.

Nos données ne rapportent pas de très fortes densités de moules dans la rivière Magog, mais cela peut être attribué aux barrages hydroélectriques et, par conséquent, au courant plus rapide dans la rivière par rapport à celui du lac. Avec un écoulement unidirectionnel plus rapide, la reproduction et la colonisation peuvent être réduites. Les gamètes planctoniques peuvent être rapidement dilués une fois qu'ils sont relâchés et les véligères peuvent être constamment perturbées par le courant ou les barrages. Ces facteurs peuvent ainsi limiter la présence de juvéniles à ces endroits. Dans de telles conditions, l'approvisionnement larvaire sera difficile. Les véligères peuvent être transportées hors de la rivière avant qu'elles aient la capacité de s'accrocher ou avant d'atteindre le stade mature [40, 41] et ainsi s'accumuler dans le lac Magog lorsque le courant et les conditions sont plus propices. Malgré ce fait, la dérive des véligères à partir des eaux en amont provenant du lac Memphrémagog peut entraîner la colonisation des plans d'eau en aval. Cela est préoccupant, car de nombreuses prises d'eau et barrages hydroélectriques sont situés dans la région. Les moules étant capables de coloniser les conduits, elles pourraient éventuellement causer de graves problèmes pour ces infrastructures qui approvisionnent plus de 175 000 personnes en eau potable et fournissent de l'électricité à la Ville de Magog et à la Ville de Sherbrooke.

Selon une étude menée par Isabelle Picard en 2018, des moules zébrées matures (15 à 28 mm) étaient déjà établies à plusieurs sites dans le lac Memphrémagog, dont la pointe Cummins, à l'île à l'Aigle, aux îles des Trois Sœurs et près de la station de pompage de la Ville de Sherbrooke. La fréquence des tailles à ces sites, en juillet 2018, indiquait que la population était dominée par les adultes (**Figure 4A**). Pour ces mêmes sites, en juillet 2019, nos résultats démontrent maintenant une distribution bimodale avec deux cohortes de moules zébrées présentant des longueurs variant entre 3 et 12 mm (juvéniles) et entre 16 et 28 mm (adultes) (**Figure 4B**).

En observant la distribution de 2019 du lac Magog, on remarque principalement la présence de juvéniles (**Figure 4C**). Si ces moules survivent, on peut s'attendre à retrouver une distribution bimodale pour ce site en 2020. En comparant la population de juvéniles des deux lacs, on observe davantage de jeunes moules dans le lac Magog que dans le lac Memphrémagog (**Figure 1Figure 4**). Ainsi, nous prévoyons que le lac Magog connaîtra une augmentation de sa population de moules zébrées au cours de 2020. Contrairement au lac Memphrémagog, pour lequel les descentes publiques de mise à l'eau sont contrôlées par des stations de lavage d'embarcation et la supervision de certificats de nettoyage, l'accès à la descente de la plage publique du lac Magog à Deauville ne possède pas de station de lavage. Pour ces raisons, le lac Magog peut développer de fortes densités de moules zébrées avec le temps grâce à l'approvisionnement larvaire provenant du lac Memphrémagog auquel s'ajoute la possibilité d'introductions accidentelles par des embarcations.

5.4. Effet des facteurs environnementaux sur la colonisation des moules zébrées

Nous avons effectué une analyse de régression multiple pour évaluer l'influence du type de substrat, du taux de calcium dans l'eau et de la présence de mulettes sur l'intensité de la colonisation par la moule zébrée. Pour conserver une distribution adéquate des données du modèle, nous avons transformé chaque variable en la multipliant par la racine cubique des valeurs. Parmi les facteurs environnementaux évalués, seuls le type de substrat et la présence de mulettes avaient un effet sur la densité de moules présentes à chaque site ($p < 0,001$).

La classification de l'habitat préférentiel pour la moule zébrée a été déterminée en fonction du type de substrat que l'on retrouve à chaque site. Cinq catégories de taille de substrat ont été utilisées (**Tableau 4**). Le diamètre du substrat est estimé en millimètre pour chaque isobathe (le long d'un transect)

et transformé en valeur phi selon l'échelle de Wentworth (1922); la valeur logarithmique négative (base 2) de la taille des particules ($\phi = -\log_2 * \text{diamètre du substrat en millimètre}$).

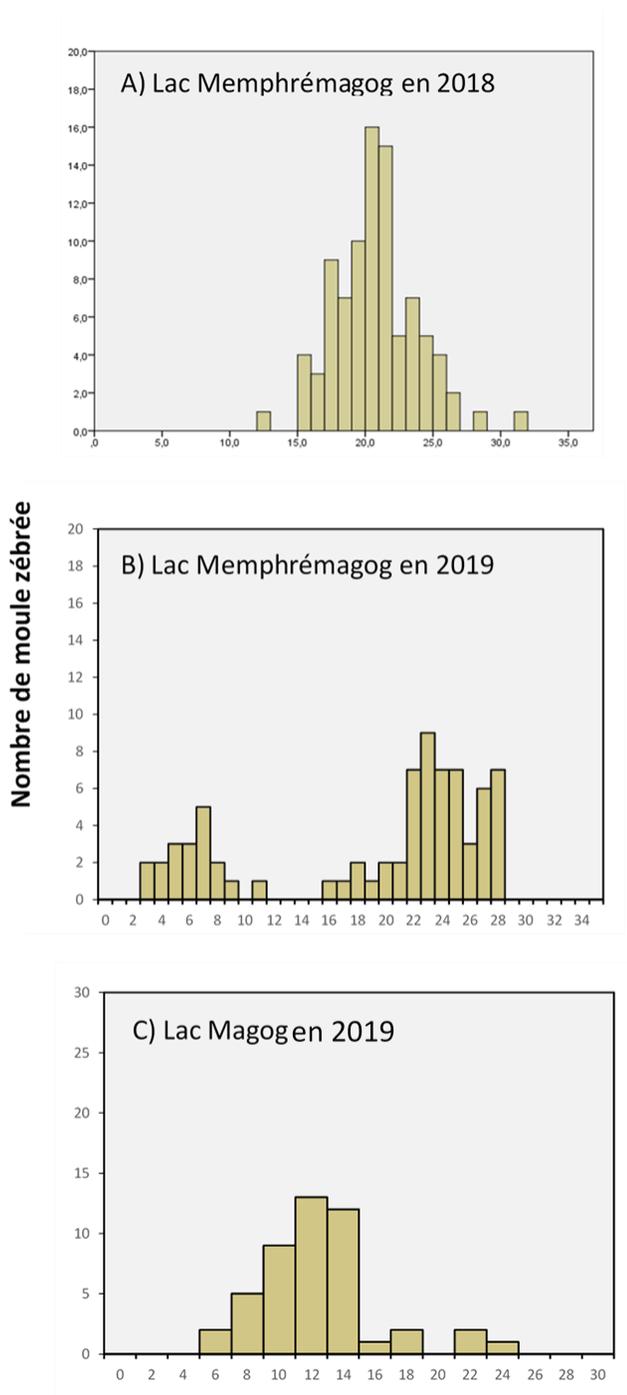


Figure 4 : Structure des populations de moules zébrées au lac Memphrémagog en 2018 et 2019 et au lac Magog en 2019.

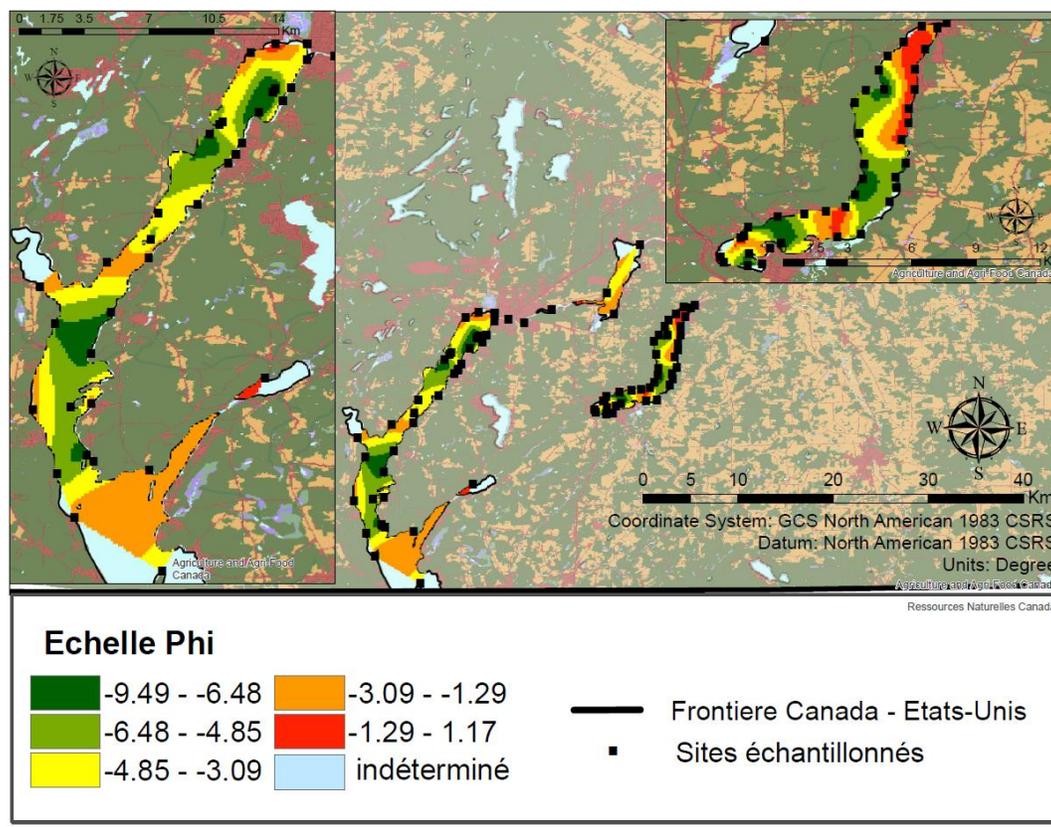
Tableau 4**Classification de la taille du substrat utilisé sur le terrain et de la valeur phi attribué.**

* La valeur médiane de l'intervalle a été prise dans la formule pour obtenir la valeur phi.

Nom	Taille du substrat	Valeur phi
Argile	0 mm – 0,5 mm	$-\text{Log}_2(0,25 \text{ mm}) = 2$
Sable	0,5 mm – 5 mm	$-\text{Log}_2(2,5 \text{ mm}) = -1,322$
Gravier	5 mm – 5 cm	$-\text{Log}_2(25 \text{ mm}) = -4,644$
Galet	5 cm – 25 cm	$-\text{Log}_2(250 \text{ mm}) = -7,966$
Bloc	> 25 cm	$-\text{Log}_2(2500 \text{ mm}) = -11,288$

Le pourcentage de recouvrement du site par type de substrat est évalué pour chaque isobathe. Le pourcentage de recouvrement est ensuite multiplié par son indice de taille (phi) afin d'obtenir une valeur moyenne telle que décrite par Mellina et Rasmussen (1994). La **Carte 2** illustre la moyenne des valeurs de l'échelle de Wentworth (phi) mesurées à chaque site (indiqué par les points). Une valeur phi plus élevée indique la dominance d'un substrat fin (sable), tandis qu'une valeur phi plus faible indique que le substrat est plus grossier (bloc).

Nos analyses démontrent qu'en général, la densité de moules zébrées augmente avec la taille du substrat présent à chaque site aux lacs Memphrémagog et Magog, un phénomène aussi observé dans le fleuve Saint-Laurent par d'autres chercheurs [42, 43]. La densité de moules zébrées augmente également avec le nombre de mulettes présentes. Ceci peut être expliqué par le fait que les mulettes peuvent être utilisées pour remplacer le substrat solide quand ce dernier est absent ou rare. Lorsqu'il y a beaucoup de substrat solide dans un habitat, la présence de mulettes colonisées est moindre. C'est pourquoi la présence de mulettes ne permet pas de prédire si un habitat est adéquat pour la colonisation des moules zébrées. Le contexte environnemental devient crucial pour déterminer le rôle des mulettes dans la colonisation des moules. Pour cette raison, nous avons également photographié l'habitat et le type de substrat à chaque profondeur, et ce, pour chaque site. Ces photos aideront à comparer les habitats et serviront de base de données de référence pour suivre les changements de l'habitat pouvant se produire à la suite de la colonisation par la moule zébrée (voir annexe 3).



Carte 2 : Carte démontrant la taille moyenne du substrat estimé selon le calcul de valeur phi pour chaque site échantillonné.

Une interpolation a été effectuée entre les points prélevés.

Notre analyse indique que la présence de mulettes et la taille du substrat permettent de prédire la densité de moules zébrées seulement pour 21 à 24 % des sites échantillonnés (**Tableau 5**). Cela indique qu'il y aurait d'autres facteurs importants déterminant la présence de moules zébrées (le courant, la topographie, la bathymétrie, les sources externes de moules, l'apport en nourriture et la concentration en minéraux, la présence de prédateurs, etc.). Par exemple, nous avons remarqué qu'à certains endroits la densité de moules présente pouvait varier selon l'isobathe (la profondeur) au sein d'un même site, mais que chaque site était unique. Ainsi, les facteurs environnementaux à eux seuls n'expliquent pas la présence de moules aux divers endroits du lac. Bien que notre étude ait démontré une plus forte densité de moules entre les îles des Trois Sœurs et la baie de Magog, la classification de l'habitat basée sur l'échelle de Wentworth n'est pas homogène (**Carte 2**). Considérant l'hydrologie du milieu, nous croyons que les moules se concentrent dans la partie nord du lac à cause de la direction du courant qui pousse les végétaux vers la baie de Magog et la décharge du lac. De plus, il y a deux marinas dans ce secteur y

augmentant la probabilité d'introduction de moules dans ce secteur et les risques que les déplacements humains sur le lac soient responsables de la colonisation de certains sites.

Tableau 5
Effet des facteurs environnementaux sur la colonisation de la moule zébrée au lac Memphrémagog.

Nous avons évalué la relation entre la taille du substrat, le taux de calcium et la présence de mulettes (nombre d'individus par mètre carré) et la densité de moules zébrées à chaque site. Une valeur marginale inférieure à 0,05 indique que le facteur influence la densité de moules.

Variable	Valeur marginale	R ²
<i>Échelle phi</i>	0,0003	0,24
<i>Calcium</i>	0,321	
<i>Densité de mulette</i>	0,0009	R² ajusté
		0,21

5.5. Taux de calcium

Une fois que les moules sont introduites dans un nouvel environnement, la qualité de l'habitat et les composantes chimiques de l'eau vont déterminer sa capacité à se reproduire, se disperser et survivre dans ce milieu [41, 42, 44-48]. Les études menées sur les populations de moules zébrées établies au Québec révèlent que des moules adultes peuvent survivre dans des eaux ayant un taux de calcium assez faible, soit environ 8 mg/L. Cependant, il n'est pas démontré que les moules installées à ces endroits peuvent s'y reproduire. Les moules ont besoin de calcium pour la croissance de leur coquille [43, 49]. Un faible taux de calcium dans l'eau limite ainsi la reproduction des individus. Le tableau 6 rapporte le type de population de moules pouvant survivre et se reproduire sous différents régimes de calcium.

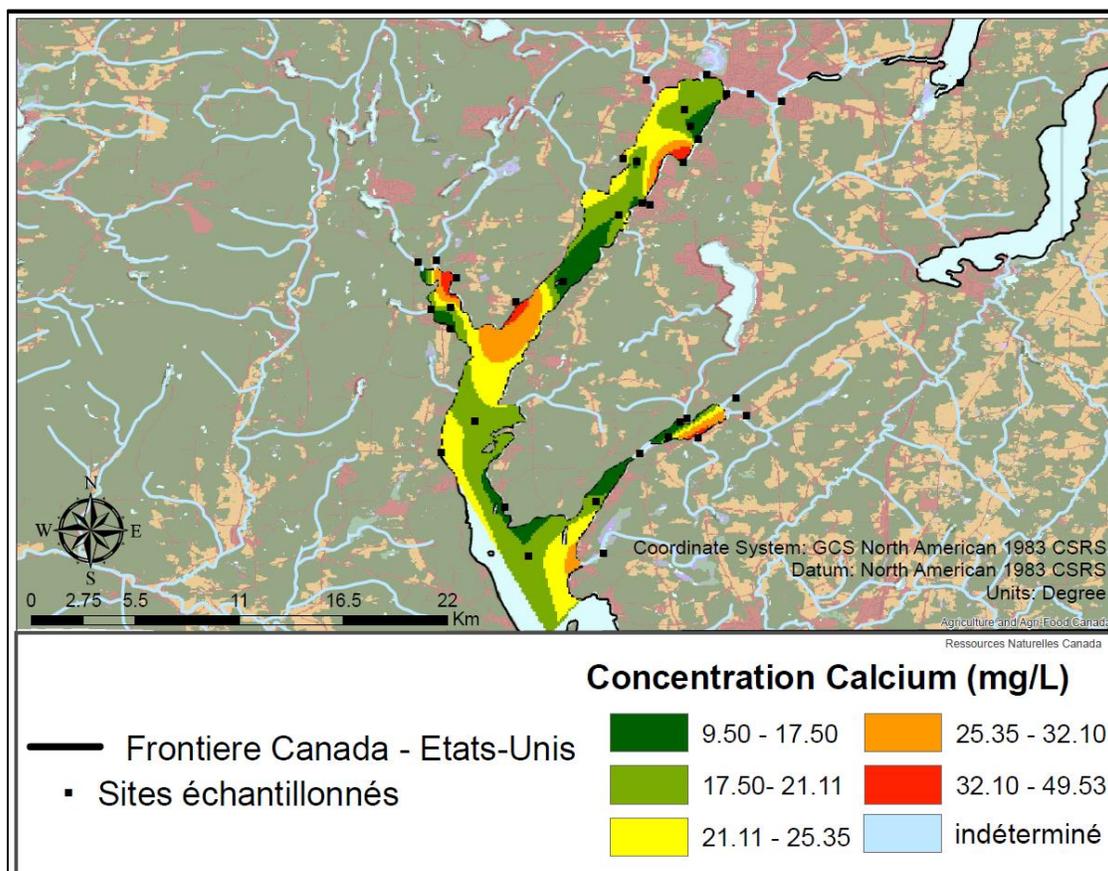
Tableau 6
Résumé des taux de calcium nécessaire à la survie, au développement et à la reproduction de la moule zébrée.

Les valeurs sont basées sur la biomasse de moules retrouvées en milieux naturels ou basées sur les observations de recherche effectuée en laboratoires [42, 48, 50, 51].

	Ca ²⁺ (mg/L)	CaCO ₃ (mg/L)
Aucun survivant adulte	> 8	20
Possibilité de survie des adultes et capacité de reproduction faible	8,5-19	20-48
Support d'une population établie et en croissance	20-25	50-62
Condition optimale et propice au développement d'invasion important	> 25	> 62

Les concentrations de calcium mesurées dans le lac Memphrémagog, la rivière Magog et le lac Magog varient entre 8,8 et 20,2 mg/L (Ca^{2+}). Selon ces valeurs, la survie des adultes et leur reproduction sont possibles, mais le milieu ne peut pas supporter une forte densité de moules (**Tableau 6**). Malgré le fait que certaines études indiquent que la concentration en calcium influence le niveau de colonisation par les moules zébrées [42, 51], ce phénomène n'est pas observé dans le lac Memphrémagog. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il n'y a pas une grande différence entre les concentrations de calcium au sein du lac et que la majorité des sites où l'on retrouve des moules zébrées semblent à la limite ou au-delà des valeurs optimales pour leur croissance et leur prolifération rapides soit environ 20 mg/L de Ca^{2+} ou 50 mg/L CaCO_3 .

Selon une étude d'évaluation des risques effectuée en 2012 par Pêches et Océans Canada, le lac Winnipeg au Manitoba, comme le lac Memphrémagog, n'était pas considérées comme un plan d'eau propice à l'invasion par la moule zébrée. Pourtant, la présence de moules zébrées a été détectée en 2013 au lac Winnipeg et en 2017 au lac Memphrémagog. Dans ces cas, l'influence réelle du taux de calcium sur la survie et la croissance des moules semblent être remise en question. Bien que le taux de calcium dans le lac Memphrémagog soit relativement faible, l'apport de fortes concentrations de calcium par les tributaires (Hermitage, Scott, St-Benoît, Bachelder, Tomkin et Gale) pourrait fournir des milieux favorables au développement des populations de moules zébrées installées à leurs exutoires (**Carte 3**). Le débit et le volume d'eau relâché dans le lac par ces tributaires peuvent augmenter le taux de calcium localement et favoriser la colonisation de ces endroits par la moule. La présence de quelques habitats favorables au sud du lac peut permettre la reproduction des moules, lesquelles vont relâcher leurs véligères dans la colonne d'eau et les disperser en aval par les courants. Le taux de calcium total dans les tributaires de l'Anse et de Saint-Benoît augmente au cours de l'été et atteint des valeurs de 40,5 mg/L et 64 mg/L respectivement vers la fin août. Ces apports d'eaux riches en calcium entre la mi-juin et le début de septembre coïncident probablement avec les événements reproductifs des moules. Les tributaires pourraient donc contribuer à l'expansion de la population dans le lac. Pourtant, selon la **Carte 2**, l'exutoire de ces tributaires et les zones ayant les plus fortes concentrations de calcium dans le lac Memphrémagog ne correspondent pas aux secteurs ayant les plus fortes densités de moules zébrées, sauf dans le secteur de l'île à l'Aigle. Pour valider cette hypothèse, il faudra évaluer la présence de moules dans les secteurs du sud-est de la baie de Fitch, au nord de la baie de Sargent et près de la baie de l'Abbaye.



Carte 3 : Concentrations moyennes du taux de calcium dans le lac Memphrémagog entre juin et août 2019.

5.6. Autres paramètres physico-chimiques

Les autres paramètres physico-chimiques mesurés n'influencent pas le nombre de moules présentes aux sites inventoriés. Les moyennes de température (21,3 °C) et de la conductivité (137,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$) mesurée entre juin et juillet 2019 étaient toutes deux supérieures aux valeurs optimales à la croissance des moules qui se situent respectivement entre 16 et 18,8 °C [52] et entre 22 à 83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [53]. Enfin, nous avons enregistré une saturation moyenne de plus de 93 % en oxygène dissous, ce qui, selon Boelman [54], est le niveau généralement préféré par les moules zébrées.

6. CONTRÔLE DES COLONIES DE MOULES ZÉBRÉES AU LAC MEMPHRÉMAGOG

Les activités visant le contrôle des moules zébrées par la collecte manuelle nous ont permis de récolter 4 497 moules en trois événements de collecte par 20 personnes pour une durée de sept heures de travail sur le terrain (**Tableau 1**). Nous avons identifié que 90 % des moules retrouvées à la station de pompage d'eau potable de la Ville de Sherbrooke colonisaient un substrat naturel, 9 % se trouvaient sur

des mulettes et 1 % étaient sur les structures humaines (**Photo 3**). Les activités de collecte peuvent être un bon moyen de sensibilisation et de formation pour le personnel qui travaille à lutter contre la moule zébrée et pour les résidents. Ces activités sont une occasion pour voir et apprendre à reconnaître la moule zébrée et les autres espèces envahissantes.

Basé sur les activités de contrôle, le rythme de collecte est d'environ 40 moules par personne par heure. Bien entendu, la collecte manuelle de moules n'est pas une méthode toujours efficace pour éradiquer les populations de moules zébrées même à ce stade d'invasion, car l'effort requis est immense (on estime à 12 000 heures pour la portion la plus infestée du lac Memphrémagog). D'ailleurs, une étude démontre qu'il faut environ 15 minutes pour enlever complètement des moules sur une surface de 1 m² [55] démontrant que l'enlèvement manuel des moules requiert beaucoup de ressources. Cependant, des activités de collectes intensives en plongée dans le lac George à New York semblent avoir porté fruit. Lors de la découverte des moules dans ce lac, les autorités locales ont débuté des campagnes de retrait manuel. Un peu plus de 21 000 moules ont été retirées du lac en 860 heures de plongée. La colonie initiale était estimée à 30 000 moules et grâce aux efforts soutenus entre 1999 et 2007, la population demeure faible [56]. Puisque le lac Memphrémagog, tout comme le lac George, n'est pas un lieu de colonisation optimal pour la moule zébrée, le contrôle par retrait manuel demeure une possibilité si les activités sont effectuées rapidement et efficacement.



Photo 3 : Illustration de la colonisation des moules zébrées à la prise d'eau potable de Sherbrooke sur un substrat naturel, artificiel et sur une mulette (de gauche à droite).

Pour établir le nombre d'heures nécessaire, il faut connaître le taux de croissance et le taux de survie des moules après un événement de reproduction. L'enlèvement manuel contribue seulement à éliminer les adultes ou les individus assez grands pour être visibles. Cette méthode ne sera pas aussi efficace si le taux de reproduction est assez élevé pour assurer le renouvellement de la population.

D'autres méthodes d'éradication pouvant aider à réduire la densité de moules zébrées ont déjà été essayées, chaque fois, dans des cas précis. Leur applicabilité dans le cas du lac Memphrémagog n'a pas été évaluée, mais ces exemples peuvent être des pistes de réflexion à explorer. Par exemple, pour les zones à risque telles que les conduits d'eau ou structures humaines, l'exposition à la lumière ultraviolette s'est avérée efficace pour tuer les véligères [57] et l'application d'un produit chloré (sous forme d'hypochlorite de sodium) a été efficace pour tuer les larves et les adultes [58]. Il existe également des tuyaux en céramique créés par Primar Filtration permettant de filtrer l'eau entrant dans les conduits et empêchant ainsi les véligères d'y entrer et de coloniser l'intérieur des conduits d'eau. Un projet de grande envergure concernant l'abaissement des niveaux d'eau pour augmenter intentionnellement la température de l'eau et le rayonnement solaire a également été réalisé au Minnesota et en Pennsylvanie pour éradiquer les moules [59]. Ces méthodes pourraient être évaluées dans la région pour réduire l'impact des moules sur certaines infrastructures ou dans des zones fortement infestées afin de créer un traitement-choc. Certaines études mentionnent aussi l'utilisation d'une série de filtres ayant des pores de diamètre décroissant jusqu'à 25 à 50 µm et pouvant être installée sur la structure des barrages hydroélectriques ou à la décharge des lacs [60], mais aucune information n'est indiquée quant au succès de cette technique ni la manière d'implanter ce système. Une telle mesure pourrait contribuer à réduire la propagation des larves et des véligères provenant du lac Memphrémagog et du lac Magog lors des périodes de reproductions. Des études seraient toutefois nécessaires pour déterminer les meilleures stratégies à envisager pour le lac Memphrémagog.

7. ÉVALUATION DU RECRUTEMENT DES MOULES ZÉBRÉES (SUBSTRATS ARTIFICIELS ET VÉLIGÈRES)

Pour évaluer le taux de recrutement des moules zébrées, un total de 33 substrats artificiels composés de quatre plaquettes en PVC de tailles distinctes ont été accrochés aux bouées de navigation aux lacs Memphrémagog, Magog et Massawippi et aux rivières Magog et Saint-François en début de saison (entre mai et juin). Seulement 8 des 17 substrats déployés ont été retrouvés au lac Memphrémagog, 9 substrats ont été récoltés dans le lac Massawippi et 7 entre le lac Magog et la rivière Saint-François dans le secteur de Sherbrooke. Lors du retrait effectué au début octobre, la corde attachant le substrat à la bouée semblait avoir été coupée pour 6 d'entre eux. Le protocole de dénombrement et de retrait est décrit à l'annexe 4 et les données recueillies sont inscrites à l'annexe 8. La présence de moules sur les plaquettes indique les sites recevant un apport en véligères au cours de l'été et la distribution de la taille des coquilles indique le stade de développement de ces individus. La colonisation

de substrats au lac Memphrémagog, au lac Magog et dans la rivière Magog suggère qu'il existe des populations fertiles de moules dans ces plans d'eau. Aucune moule n'a été retrouvée sur les neuf substrats posés au lac Massawippi ni sur le substrat localisé dans la rivière Saint-François. Considérant qu'aucune moule adulte n'a été repérée au lac Massawippi lors des inventaires, il est possible que ce lac ne soit pas encore affecté par les moules zébrées.

La densité de colonisation du substrat artificiel est plutôt faible, soit entre 0 et 1,95 moule/cm² (ou 0 à 415 moules par mètre carré). Le lac Winnipeg, qui a été envahi par la moule zébrée en 2013, présente des densités moyennes variant entre 0,5 à 16,5 moules/cm² en 2016 [61]. Le taux de colonisation et de recrutement des moules zébrées est encore faible. Cependant, les données du décompte des substrats artificiels (**Tableau 7**) révèlent la présence de populations fertiles de moules de l'île Lord et à la baie de Magog, puisque des moules juvéniles ont été retrouvées sur les substrats artificiels dans ces secteurs. Des moules adultes se retrouvent également dans le même secteur. Il n'est donc pas surprenant de retrouver de jeunes moules sur les substrats artificiels en aval de ces sites. Les véligères dérivent avec le courant et s'installent lorsqu'elles rencontrent un milieu adéquat. La présence de moules à l'île Lord est intéressante, car selon nos suivis, peu de moules y avaient été retrouvées en 2019, entre 0,5 et 1,5 m de profondeur. Les moules retrouvées étaient présentes sur des mulettes à une profondeur de plus de 1,5 m. Les prélèvements manuels de moules zébrées effectués dans ce secteur, en 2018, pourraient expliquer ce résultat. Il est possible que les véligères ayant colonisé les substrats artificiels aient été relâchées par les moules situées à plus de 1,5 m. De plus, plusieurs moules colonisent les mulettes près de l'aire de mise à l'eau des embarcations du camp Cedar Lodge sur la rive est du lac Memphrémagog. Il sera important de surveiller l'expansion des populations dans ce secteur au cours des prochaines années.

La plus grande densité de moules sur des substrats artificiels a été retrouvée dans la baie Beaulieu de la rivière Magog et près du camping et du parc de la plage au lac Magog. Le lac Magog est vulnérable à la contamination et à la colonisation à cause de la présence, en amont, de populations reproductrices, soit dans la rivière Magog et le lac Memphrémagog. De plus, aucune station de lavage n'est aménagée à la plage du lac Magog, alors qu'il s'agit d'un endroit fort achalandé au cours de l'été, surtout durant les périodes de reproduction des moules, soit entre la mi-juin et la fin août. Il est probable que cet endroit puisse également représenter une source d'apport de moules zébrées.

Tableau 7
Résumé du dénombrement de moules juvéniles sur les substrats artificiels récoltés en 2019.

Site	Coordonnées (degré décimal)		Nbr de moules	Densité (#/m ²)	Taille (mm)
LAC MEMPHRÉMAGOG					
Île Charest	45,262560	-72,163010	11	24	3,5 - 7
Baie Sargent (nord-ouest)	45,164610	-72,297850	0	0	s. o.
Île Lord (nord-ouest)	45,175550	-72,239860	1	2	4
Baie Oliver	45,199940	-72,208160	5	11	4 - 5,5
Trois Sœurs (nord)	45,248540	-72,176050	31	69	2 - 6,5
Prise d'eau de Sherbrooke	45,256340	-72,166380	28	62	1,5 - 7,7
Baie Longue (nord-est)	45,075820	-72,21440	0	0	s. o.
Vale Perkins	45,115520	-72,268130	0	0	s. o.
LAC MAGOG					
Club Nautique	45,324593	-72,043787	0	0	s. o.
Parc de la Plage	45,334713	-72,025194	1	2	2
Camping Lac Magog	45,324559	-72,02345	15	33	2 - 3
RIVIÈRE MAGOG					
Baie Beaulieu	45,342801	-71,989014	185	412	1 - 12
Aval îlots de la Scaswan	45,380418	-71,961142	7	16	1 - 8
Pont de la route 112	45,397845	-71,898516	0	0	s. o.
RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS					
Saint-François	45,477472	-71,941470	0	0	s. o.

8. PRÉVISIONS

Les études menées par le Dr Anthony Ricciardi indiquent que le taux de mortalité des moules et le ratio de la biomasse des moules par moule peuvent prédire le stade d'invasion d'un milieu. Pour dresser un portrait de la pression exercée par les moules zébrées sur les moules indigènes et évaluer le stade d'invasion de la moule au lac Memphrémagog et au lac Magog, nous avons comparé nos données à celles présentées par Ricciardi [62] (**Figure 5**). Nous avons observé des mortalités très faibles, ce qui indiquerait que l'invasion de ces lacs est à leur début.

La masse des Dreissenidés colonisant les moules représente pour le moment, une très petite fraction de la masse totale de moules. Nous avons observé un maximum de trois moules par moule, et ce, très rarement (annexe 5). La majorité des moules n'était pas colonisée par les moules zébrées. Le

modèle de régression de Ricciardi (2003) prédit que les populations portant une masse moyenne de Dreissenidés dépassant environ 40 % de leur propre masse subiront une diminution de taille de près de la moitié. Les populations ayant des ratios supérieurs à 1,0 (masse de moules/masse de mulettes) sont susceptibles de disparaître. En évaluant le rapport de masse entre les moules et les mulettes, nous avons obtenu une moyenne de 6 % et des pourcentages variants entre 0,02 et 32 % de la masse totale de mulettes. Bien que les moules zébrées puissent entraver la performance des mulettes même lors d'un faible taux de colonisation, les populations de mulettes ne sont pas encore en danger. L'invasion du lac Memphrémagog est encore à ces débuts, mais il sera important de suivre l'évolution des populations et du taux de colonisation des mulettes par les moules.

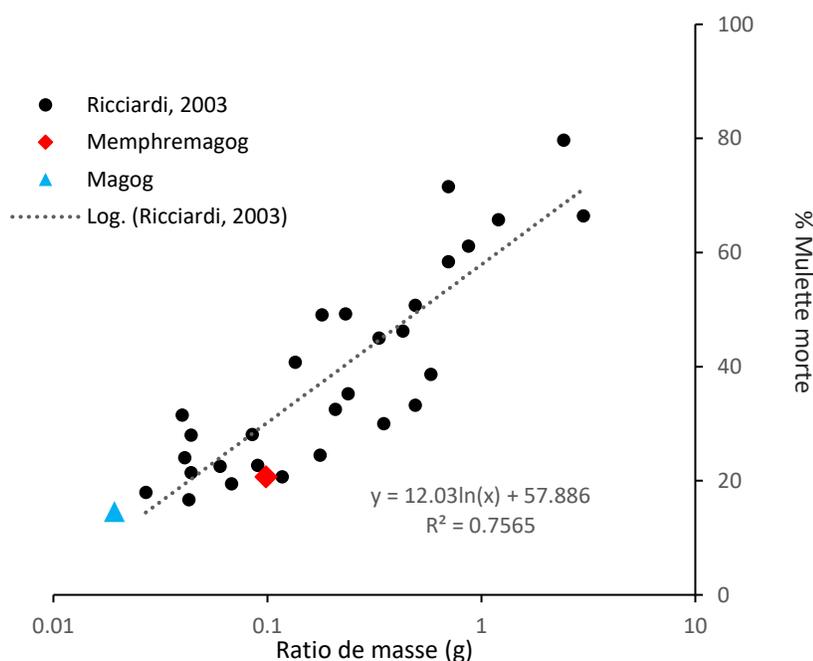


Figure 5 : Relation entre le taux de mortalité des mulettes en fonction du rapport massique moules zébrées et mulettes.

Le taux de mortalité (axe des y) est calculé par la proportion de mulettes mortes et de mulettes vivantes retrouvées pour chaque quadrat. Le ratio de masse (axe des x) est mesuré en produisant un ratio de la masse des moules retrouvées sur chaque mulette et la masse de la mulette colonisée. Une moyenne de ces taux a été calculée pour le lac Memphrémagog et le lac Magog. Les valeurs en noires proviennent des études de Ricciardi et coll. (1996), Hallac & Marsden (2000), A. Ricciardi & L.E. Johnson (données non publiées) et Ricciardi (2003).

Une fois la moule zébrée installée dans un nouveau milieu, la croissance de la colonisation peut se faire assez rapidement. Par exemple, la densité des moules a considérablement augmenté au cours de la période d'étude de cinq ans au bassin 8 du Mississippi passant de 3,5 moules par mètre carré en 1992 à près de 15 000 moules par mètre carré en 1996 (**Figure 6**). De façon similaire, le lac Winnipeg a subi une

augmentation considérable de sa population de moules zébrées passant de 3 moules par mètre carré à 165 000 individus par mètre carré en six ans, et ce malgré un traitement chimique au cours des premières années d'invasion [61].

Le scénario présenté dans la figure 6 est envisageable pour le lac Memphrémagog. Dans le cas du bassin 8 du Mississippi, il y avait une phase de latence au début de l'invasion. Puis, un boom démographique soudain s'est produit, entraînant une cascade d'impacts environnementaux et économiques. Des études antérieures ont démontré que la densité de la population dépend du temps écoulé depuis la colonisation initiale, de l'abondance relative du substrat disponible pour la colonisation, de la morphométrie des lacs et du niveau trophique. Selon une étude sur l'envahissement de la moule zébrée, il semblerait que les lacs ayant une plus grande superficie subissent un taux de colonisation et de dispersion plus important que les petits lacs [63]. Le lac Memphrémagog pourrait subir le même sort que le lac Winnipeg et le bassin 8 du Mississippi. Burlakova, Karatayev [64] suggère que *Dreissena polymorpha* atteint généralement la densité de population maximale 7 à 12 ans après son introduction initiale. Par conséquent, cette année étant la troisième année depuis la détection initiale, nous pourrions nous attendre à des densités maximales d'ici 4 à 9 ans dans le lac Memphrémagog et le lac Magog.

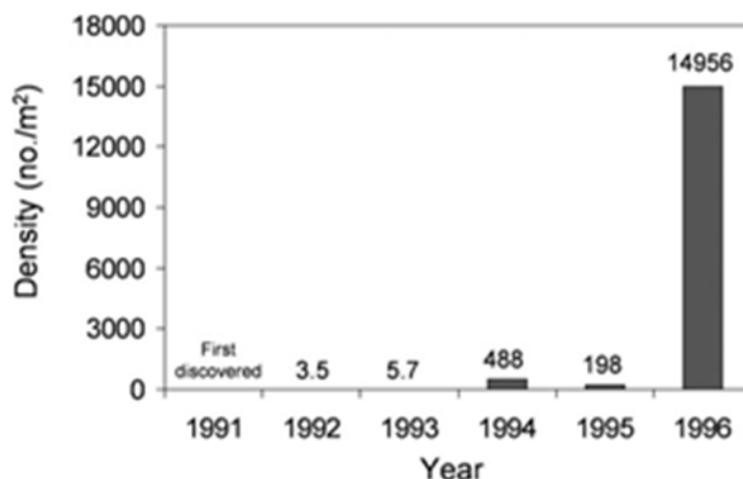


Figure 6 : Densité de moules zébrées dénombrées annuellement depuis leur apparition dans le haut de la rivière Mississippi entre 1992 et 1996.

(Tiré de Cope et coll., 2006)

Il se peut que l'invasion soit un peu plus lente au lac Memphrémagog compte tenu du taux de calcium qui est sous-optimal dans le système actuel. Quant à l'abondance relative du substrat et du niveau trophique, Burlakova, Karatayev [64] présentent des lacs avec des substrats très variables pour augmenter

la stabilité de la population de moules et des lacs eutrophes, généralement dominés par des macrophytes, comme dommageables aux moules zébrées. À notre connaissance, le lac Memphrémagog possède des substrats très variables et est quelque peu oligomésotrophe. À mesure que la population de moules zébrées augmentera, la proportion de moules zébrées adultes augmentera également. Comme les moules zébrées se nourrissent par filtration, les individus adultes traiteront chacun jusqu'à un litre d'eau par jour [65]. Dans le lac St-Claire, la population est suffisamment grande pour filtrer le lac plusieurs fois par jour, ce qui engendre un problème sérieux pour les autres espèces se nourrissant de seston (ex. : poissons, unionidés) [66]. Par exemple, les 3 700 moules collectées à l'île des Trois Sœurs pourraient filtrer plus de 3 000 litres d'eau par jour.

9. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

Cette étude offre une base de données initiale pour suivre l'infestation des moules zébrées au cours des prochaines années dans le lac Memphrémagog, le lac Magog et la rivière Magog. Nous fournissons également une analyse préliminaire des facteurs régulant la densité des moules zébrées. Nous avons démontré que le substrat et la densité de mulettes sont des prédicteurs significatifs de la densité de moules zébrées. Nous n'avons aucun doute que la moule zébrée s'est installée de manière définitive dans le lac Memphrémagog. Les actions prioritaires recommandées sont faites dans le but de contrôler la propagation des moules zébrées hors du lac et de tenter de réduire sa croissance au sein même du lac. Pour ce faire, nous recommandons une surveillance rigoureuse de la population et de ces sources potentielles.

9.1. Plan d'intervention contre les EEEs

Nous recommandons d'établir un plan d'intervention contre les EEE des milieux aquatiques, dont la moule zébrée en consultant les intervenants locaux (municipalités, villes, organismes à but non lucratif, etc.) afin de déterminer les actions ciblées qui seront posées dans chaque plan d'eau selon le statut d'invasion, le budget et les ressources disponibles. La moule zébrée est installée dans le lac Memphrémagog, la rivière Magog et le lac Magog, donc ces endroits peuvent devenir une source pour les cours d'eau environnants. Un plan d'intervention permettra d'agir rapidement et efficacement pour lutter contre les moules zébrées (ainsi que les autres EEE) ainsi que de clairement identifier le rôle de chacun des intervenants. Les actions et les interventions doivent être réalisées collectivement et chacune des municipalités et des villes doivent adopter une même vision et un même plan d'action. Ce plan permettra

de définir le niveau d'intervention souhaitée. Bien que ce rapport permette de mieux comprendre le stade d'invasion dans le lac Memphrémagog et les cours d'eau en aval de ce dernier, plus d'informations seront nécessaires afin de réaliser un plan d'intervention concret et efficace. Nous recommandons d'effectuer des études, des sondages ou de faire une collecte d'information auprès des partenaires et des intervenants afin de connaître les activités des usagers, le nombre et le type d'infrastructure vulnérable et les problématiques connues reliées à la réglementation et aux méthodes de contrôle.

- i. **Sondage des activités des usagers** : La création d'un formulaire de suivi des déplacements des usagers entre les plans d'eau de la région et provenant de l'extérieur pourrait aider à cibler les lacs et les rivières les plus à risque sur le territoire et ainsi, choisir des méthodes de contrôle et de prévention plus ciblées. Ce formulaire demanderait aux usagers d'énumérer les plans d'eau visités dans les sept jours précédents et évaluer les habitudes de fréquentation des cours d'eau. Sachant que les moules zébrées peuvent survivre hors de l'eau pour une période de 3 à 18 jours et que la majorité des introductions de moules proviennent des embarcations contaminées, cette information est très pertinente pour choisir le type de réglementation, les méthodes de contrôle et de prévention (tel que les stations de lavage, la fréquence de nettoyage, les sources de EEE, etc.).
- ii. **Étude de risque et des coûts** : Une étude de risque peut être effectuée pour évaluer les plans d'eau, les infrastructures et les activités aquatiques et nautiques les plus à risque de contamination. Cette étude pourrait également évaluer les coûts de gestion et de contrôle des EEE.
- iii. **Évaluation de méthode de contrôle** : En 2019, nous avons effectué des collectes manuelles de moules pour tenter de contrôler les populations à proximité des Îles des Trois Sœurs et de la prise d'eau potable de la ville de Sherbrooke. En 2020, il sera important de revisiter ces sites en début de saison afin d'évaluer le taux de recolonisation des moules. De plus, d'autres activités de contrôles par la collecte manuelle pourraient être effectuées à plusieurs sites ayant de fortes densités. Il sera important de bien délimiter les zones d'intervention afin de pouvoir mesurer le succès de la méthode. Ces actions permettront de savoir si la collecte manuelle de moule peut éradiquer de nouvelles colonies qui s'installeraient dans les cours d'eau de la région et si ces collectes peuvent contrôler les populations du lac Memphrémagog, de la rivière Magog et du lac Magog. Les densités de moules sont encore assez faibles pour considérer cette méthode dans le plan d'intervention.

9.2. Détection et suivi des populations

- i. **Suivi des populations** : En 2019, nous avons évalué la présence, les densités, le recrutement des moules zébrées par des inventaires actifs sur le terrain et en posant des substrats artificiels (passifs). Ces méthodes permettent de suivre le développement des populations de moules et de détecter leur présence. Pour 2020, il est important de continuer d'effectuer le suivi des populations de moules zébrées et de leur distribution. Pour ce faire, nous

recommandons d'effectuer de la recherche active en apnée ou plongée dans les plans d'eau contaminés (lac Memphrémagog, lac Magog, rivière Magog) en effectuant un relevé de présence/absence à chaque kilomètre. Comme pour 2019, toutes les moules trouvées durant la recherche sont collectées et la superficie couverte est notée. Ceci permet d'effectuer des activités de contrôles tout en évaluant la densité ce qui permet de suivre l'étendue des populations de moules dans le cours d'eau.

- ii. **Détection par analyse d'ADN environnemental** : Pour effectuer la détection de la présence de moule dans les cours d'eau non contaminés, nous recommandons d'effectuer des prélèvements par ADN environnemental en début (et si possible) en fin de saison. L'ADN environnemental peut permettre la détection de moule zébrée sans avoir besoin d'une confirmation visuelle. En partenariat avec les universités ou le MFFP, ces prélèvements peuvent être faits annuellement afin de détecter rapidement une nouvelle invasion. Dans le cas d'une détection positive, un inventaire terrain serait recommandé. Le protocole de suivi des populations et de la distribution des moules (ci-haut) serait adéquat. Des méthodes d'éradications ou de contrôle pourraient ensuite être appliquées.
- iii. **Détection par l'utilisation de substrat** : Les substrats artificiels sont idéals pour détecter la présence de moules juvéniles et les populations reproductrices. Nous recommandons d'utiliser ces substrats dans les cours d'eau en aval des cours d'eau contaminés, aux sites difficiles d'accès ou autres sites dont on souhaite connaître le potentiel reproductif. Le lac Memphrémagog est une source de moule zébrée pour la rivière Magog et le lac Magog. Les moules produites dans ces cours d'eau pourraient éventuellement se retrouver dans la rivière Saint-François. Pour faire le suivi du recrutement et de la dispersion de la moule zébrée dans la rivière Magog, au lac Magog et dans la rivière Saint-François, nous recommandons d'utiliser les substrats artificiels.
- iv. **Surveillance pour la présence de moules quaggas** : Surveiller les peuplements de moules zébrées pour détecter la présence de moules quaggas (*Dreissena bugensis*). Les moules quaggas, une espèce exotique envahissante comparable aux moules zébrées, peuvent tolérer les changements de régimes alimentaires et de températures plus facilement que les moules zébrées et peuvent, dans certains cas, dominer les peuplements de Dreissenidés. La présence de moules quaggas en plus de moules zébrées pourrait causer encore plus de dommages aux écosystèmes de la région [67].

9.3. Réviser la réglementation selon le niveau d'intervention souhaité

- i. **Limitation du risque de propagation** : Le lac Memphrémagog et son réseau hydrique en aval constituent une source potentielle de moules zébrées pour les autres plans d'eau. En partenariat avec les différentes instances municipales, provinciales et fédérales, il est nécessaire d'imposer des restrictions quant à l'accès public et privé des plans d'eau. Pour éviter la propagation hors du lac, nous recommandons d'interdire l'accès d'un plan d'eau aux embarcations provenant d'un milieu contaminé par les EEEs ce qui inclut les lacs Memphrémagog, Magog et Champlain, les rivières Magog et Richelieu ainsi que le fleuve

Saint-Laurent et les Grands Lacs. Les usagers souhaitant voyager d'un cours d'eau à un autre devront posséder un certificat de décontamination valide qui a été effectué le jour même de la mise à l'eau souhaitée par l'utilisateur. Ce type de réglementation est appliqué aux États-Unis, pour plus d'informations veuillez consulter le document UMPS III (2016) rédigé par le *Pacific States Marine Fisheries Commission*. Plusieurs municipalités des Laurentides exigent le lavage des embarcations et vérifient le certificat pour chaque embarcation. Cette mesure est généralement plus fréquente dans les lacs de petite taille avec un nombre limité d'accès.

- ii. **Inspection et décontamination par le lavage :** Pour faciliter l'application de ce règlement, il peut être souhaitable d'autoriser la mise à l'eau d'une embarcation et de ces usagers seulement si une inspection a été effectuée. Cette inspection peut impliquer la décontamination par le lavage. Nous recommandons de munir tous les points d'accès aux lacs et rivières de stations d'inspection et de décontamination pour les embarcations et de panneaux de sensibilisation informatifs pour les usagers (accès aux plages et embarcations légères). Une inspection devrait être nécessaire pour toutes les embarcations voulant accéder aux lacs ou rivières de la région.
- iii. **Acceptabilité sociale de la réglementation :** Il peut être intéressant d'offrir un forfait annuel permettant un nombre d'inspection et de nettoyage d'embarcation illimité aux stations permanentes des lacs de la région. Un montant forfaitaire, peu dispendieux pour les usagers fréquents encouragerait un nettoyage plus fréquent des embarcations qui voyagent entre les différents plans d'eau et limiterait la propagation des EEEs à l'extérieur du réseau hydrique du lac Memphrémagog.
- iv. **Formation pour l'inspection et la décontamination :** Tous les intervenants doivent contribuer à la surveillance, au contrôle et à la prévention de la propagation de la moule zébrée hors du lac Memphrémagog. Il serait important d'offrir une formation pour les employés responsables d'effectuer la surveillance et les étapes de décontamination des embarcations à l'entrée (ou à la sortie des plans d'eau). L'inspection vise à retirer toutes les plantes et les débris accrochés aux embarcations et à la remorque, à vider l'eau de cale et du moteur et à nettoyer les surfaces externes à l'eau chaude et sous pression.

9.4. Intégrer la décontamination des embarcations et de l'équipement nautique à la pratique d'activités aquatiques et assurer la qualité des inspections

- i. Lors de l'étude de 2019, nous avons constaté que certains accès à l'eau n'étaient pas bien contrôlés. Nous avons retrouvé la présence de moules zébrées à tous ces endroits (par ex. Plage Deauville, rampe Bournival). Nous recommandons fortement de munir tous les cours d'eau de stations d'inspection et de décontamination.
- ii. La méthode utilisée lors du nettoyage est très importante pour assurer la décontamination des embarcations et de l'équipement nautique. Les techniques du programme WIT des États-Unis ont été validés par des études et suggèrent d'utiliser une température de 50 °C au point de contact avec une pression de 3 000 à 3 500 psi pour une durée variant entre 10 et 160

secondes selon la pièce à décontaminer. Pour s'assurer que de bonnes techniques sont effectuées, il est possible de suivre une formation par des agents certifiés. Basés sur les techniques WIT et autres études sur les paramètres de nettoyage, nous recommandons de rédiger un guide de bonnes pratiques détaillé ou offrir une formation sur ces principes aux employés des stations de nettoyage pour assurer l'élimination des EEEs lors du processus de décontamination.

- iii. Il peut être pertinent de renommer les stations de lavage ou de nettoyage « station de décontamination des EEEs ». Cette formulation permet une meilleure compréhension des enjeux par l'utilisateur. Tous les usagers « lavent » leur embarcation, mais peu d'entre eux les décontaminent.

9.5. Sensibilisation des usagers et des citoyens riverains

La sensibilisation des utilisateurs est un moyen simple et essentiel de la lutte contre les EEEs. En mobilisant les citoyens et en les encourageant à s'impliquer dans cette lutte, les plans d'eau seront mieux protégés. Les citoyens peuvent effectuer une surveillance et déclarer la présence de moules dans des secteurs difficiles d'accès ou inconnus des autorités. Les utilisateurs des plans d'eau doivent faire partie de la solution et agir pour lutter contre l'invasion. Ils doivent aussi se conformer aux restrictions et réglementations, dont le lavage et l'inspection des embarcations, pour assurer un meilleur taux de succès. Nous nommons quelques idées qui sont effectuées dans d'autres communautés.

- i. Utilisation de messages ciblés visant tous les usagers présents et futurs. Par exemple, au Manitoba, le gouvernement a produit des livres à colorier sur la moule zébrée pour éduquer les enfants. Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec a produit plusieurs dépliants et publicités concernant les espèces exotiques envahissantes qui peuvent être distribués aux usagers. Des affiches ou des panneaux de sensibilisation peuvent être installés aux endroits clés (marinas, accès à l'eau, descente publique, etc.).
- ii. Organiser des activités de sensibilisations, de collection ou de détection de moules zébrées (ou autres espèces envahissantes) pour les familles, les enfants et les plaisanciers durant la saison estivale.
- iii. Favoriser la participation citoyenne en effectuant des formations ou des visites terrain pour enseigner aux riverains à reconnaître et à signaler la présence de EEEs, dont la moule zébrée.
- iv. Organiser un programme volontaire de reconnaissance pour les usagers qui effectuent le nettoyage de leur embarcation et de matériel nautique. Émettre un autocollant (pouvant être posé sur l'embarcation) qui indique la contribution de l'utilisateur à protéger son cours d'eau.

9.6. S'entourer de partenaires locaux pour des interventions ciblées

- i. Conserver l'expertise localement et attirer une personne ou un groupe de personnes responsables de la gestion des espèces exotiques envahissantes. Ces dernières ne se limitent pas aux frontières entre les différentes juridictions. Il est nécessaire d'encourager la collaboration et coopération entre les acteurs. Par exemple, les associations de lacs, les organismes à but non lucratif (ex. : Memphrémagog Conservation Inc., Bleu Massawippi, etc.), les associations de propriétaires (ex. : Association des propriétaires des boisés sur le lac, Domaine des Villas de l'Anse, etc.), les pêcheurs, les riverains ainsi que les citoyens peuvent aider à la sensibilisation, à la surveillance, aux activités de collecte et à la décontamination du matériel et des embarcations.
- ii. Les plongeurs locaux peuvent aussi être des alliés pour le repérage et la collecte de moules dans des zones plus difficiles d'accès. Des formations sur l'identification de la moule zébrée et les méthodes de collectes acceptées pourraient être enseignées aux partenaires.
- iii. Il faudra toutefois travailler de concert avec le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs pour améliorer la réglementation au sujet de la collecte de moules zébrées par les citoyens et les instances municipales. Pour l'instant, il est requis de faire une demande de permis pour la collecte des moules et leur transport. S'il est possible de revoir la réglementation avec le ministère, cela pourrait faciliter la participation citoyenne à l'éradication des moules et l'étude des EEEs dans le lac.

9.7. Lac Massawippi et autres plans d'eau non contaminés

Considérant qu'aucune moule zébrée n'a été repérée au lac Massawippi lors des inventaires de l'été 2019 et sur les substrats artificiels, il est possible que ce lac ne soit pas encore affecté par cette espèce. Nous recommandons d'effectuer un suivi mensuel par l'ADN environnemental au cours de l'été 2020, de continuer la surveillance des accès au lac et le lavage obligatoire des embarcations et de poursuivre le suivi du recrutement à l'aide de substrats artificiels. Il sera important de s'assurer qu'aucune embarcation et qu'aucun équipement n'ayant pas été décontaminé n'y soit admis. Tout échange avec le lac Memphrémagog et le réseau hydrique situés en aval (rivière Magog, lac Magog) peut être une source de contamination pour le lac Massawippi et les autres plans d'eau de la région.

9.8. Rivière et lac Magog

La majorité des moules retrouvées le long de la rivière Magog et du lac Magog sont de petites tailles. Nous croyons que la majorité des individus proviennent du lac Memphrémagog. Les véligrès relâchées dans le lac Memphrémagog sont transportées par les courants et s'installent lorsque ceux-ci diminuent. Nous recommandons de continuer le suivi du recrutement et de la propagation de juvénile

dans ces cours d'eau en posant des substrats artificiels. L'un des moyens qui pourraient s'avérer efficace pour réduire l'apport en véligère serait d'installer une série de filtres ayant des pores de diamètre décroissant (idéalement jusqu'à 25 à 50 μm) sur les structures des barrages hydroélectriques ou à la décharge des lacs durant quelques jours suivant les événements de reproduction des moules. Une évaluation de la faisabilité d'un tel projet serait toutefois nécessaire.

Nous avons aussi repéré quelques moules adultes (tailles 13 à 19 mm) sur des mulettes près de la descente située sur la rue Bournival au lac Magog (**Photo 4**). Leur présence suggère qu'il y a peut-être eu une introduction à partir de cet accès qui n'est pas surveillé. Les embarcations et les remorques utilisant cet endroit peuvent servir de point d'introduction de moules dans le lac. Il ne suffit que de quelques introductions d'un petit nombre d'individus pour débiter une population. Si celle-ci s'ajoute à l'apport en véligères provenant des cours d'eau en amont, l'établissement et la propagation pourraient être rapide. Nous recommandons d'effectuer un suivi des populations dans le secteur de la plage de Deauville, car nous avons observé une forte présence de moule. Nous recommandons également d'installer une station d'inspection de décontamination des embarcations permanente à la plage pour éviter de nouvelles introductions dans le lac Magog.



Photo 4 : Moules et mulettes retrouvées à la descente sur la rue Bournival au sud-ouest du lac Magog.

9.9. Autres recommandations

Effectuer un suivi scientifique pour suivre le développement des populations et mieux comprendre le contexte local. Travailler en partenariat avec les universités ou les groupes de recherches pour mettre sur pied des projets intéressants et peu coûteux. Il existe des subventions du Conseil de

recherches en sciences naturelles et en génie du Canada pour des projets exigeant le partenariat avec les secteurs publics ou privés.

- i. Effectuer des prélèvements d'eau pour évaluer les taux de calciums à plusieurs sites le long des berges du lac Memphrémagog. Ces prélèvements devraient être faits plusieurs fois durant l'été pour dresser un portrait plus complet de ces valeurs.
- ii. Regrouper des sites d'attributs environnementaux similaires pour produire des modèles plus précis dans le but de prédire les secteurs les plus à risque.

10. RÉFÉRENCES

1. Moorhouse, T.P. and D.W. Macdonald, *Are invasives worse in freshwater than terrestrial ecosystems?* WIREs Water, 2015. **2**(1): p. 1-8.
2. Wołczuk, K., et al., *Biological invasions in the aquatic ecosystems of Europe as a threat to biodiversity.* Ecological Questions, 2011. **15**.
3. David, P., et al., *Impacts of Invasive Species on Food Webs: A Review of Empirical Data.* Advances in Ecological Research, 2017. **56**: p. 1-60.
4. Gallardo, B., et al., *Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems.* Global Change Biology, 2016. **22**(1): p. 151-163.
5. Doherty, T.S., et al., *Invasive predators and global biodiversity loss.* Proc Natl Acad Sci U S A, 2016. **113**(40): p. 11261-11265.
6. RICCIARDI, A., R.J. NEVES, and J.B. RASMUSSEN, *Impending extinctions of North American freshwater mussels (Unionoida) following the zebra mussel (Dreissena polymorpha) invasion.* Journal of Animal Ecology, 1998. **67**(4): p. 613-619.
7. Connelly, N.A., et al., *Economic impacts of zebra mussels on drinking water treatment and electric power generation facilities.* Environ Manage, 2007. **40**(1): p. 105-12.
8. Nakano, D. and D.L. Strayer, *Biofouling animals in fresh water: biology, impacts, and ecosystem engineering.* Frontiers in Ecology and the Environment, 2014. **12**(3): p. 167-175.
9. Zhang, C. and K.J. Boyle, *The effect of an aquatic invasive species (Eurasian watermilfoil) on lakefront property values.* Ecological Economics, 2010. **70**(2): p. 394-404.
10. Chakraborti, R.K., S. Madon, and J. Kaur, *Costs for Controlling Dreissenid Mussels Affecting Drinking Water Infrastructure: Case Studies.* Journal - AWWA, 2016. **108**(8): p. E442-E453.
11. Hellmann, J.J., et al., *Five potential consequences of climate change for invasive species.* Conserv Biol, 2008. **22**(3): p. 534-43.
12. McNeely, J., *Invasive species: A costly catastrophe for native biodiversity.* Land Use and Water Resources Research, 2001. **1**.
13. Benson, A., *Chronological History of Zebra and Quagga Mussels (Dreissenidae) in North America, 1988-2010*, in *Quagga and Zebra Mussels*. 2013, CRC Press. p. 9-32.
14. Zhu, B., et al., *Alteration of Ecosystem Function by Zebra Mussels in Oneida Lake: Impacts on Submerged Macrophytes.* Ecosystems, 2006. **9**(6): p. 1017-1028.
15. Ram, J.L. and R.F. McMahon, *Introduction: The Biology, Ecology, and Physiology of Zebra Mussels*. Integrative and Comparative Biology, 2015. **36**(3): p. 239-243.
16. Gossiaux, D.C., P.F. Landrum, and S.W. Fisher, *The assimilation of contaminants from suspended sediment and algae by the zebra mussel, Dreissena polymorpha.* Chemosphere, 1998. **36**(15): p. 3181-3197.
17. Stumpf, P., et al., *Accumulation of a low pathogenic avian influenza virus in zebra mussels (Dreissena polymorpha).* Avian Dis, 2010. **54**(4): p. 1183-90.
18. Conn, D., *Book Review: The Zebra Mussel in Europe, G. van der Velde, S. Rajagopal, and A. bij de Vaate, eds. (2010 Backhuys Publishers, Leiden, 490 p).* Aquatic Invasions, 2011. **6**: p. 123-124.
19. Hebert, P.D.N., B.W. Muncaster, and G.L. Mackie, *Ecological and Genetic Studies on Dreissena polymorpha (Pallas): a New Mollusc in the Great Lakes.* Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989. **46**(9): p. 1587-1591.
20. Carlton, J.T., *The Zebra Mussel Dreissena polymorpha Found in North America in 1986 and 1987.* Journal of Great Lakes Research, 2008. **34**(4): p. 770-773.
21. Borcharding, J., *The annual reproductive cycle of the freshwater mussel Dreissena polymorpha Pallas in lakes.* Oecologia, 1991. **87**(2): p. 208-218.

22. Rajagopal, S., et al., *Effects of temperature, salinity and agitation on byssus thread formation of zebra mussel Dreissena polymorpha*. Netherland Journal of Aquatic Ecology, 1996. **30**(2): p. 187-195.
23. Carlton, J.T., *Dispersal mechanisms of the zebra mussel*, ed. S.a.T.F. Nalepa. Vol. Zebra mussels: biology, impacts and control. 1993, Ann Arbor, Michigan: Lewis Publishers.
24. Johnson, L.E. and J.T. Carlton, *Post-Establishment Spread in Large-Scale Invasions: Dispersal Mechanisms of the Zebra Mussel Dreissena Polymorpha*. Ecology, 1996. **77**(6): p. 1686-1690.
25. Johnson, L.E., A. Ricciardi, and J.T. Carlton, *Overland dispersal of aquatic invasive species: A risk assessment of transient recreational boating*. Ecological Applications, 2001. **11**(6): p. 1789-1799.
26. Ricciardi, A., R. Serrouya, and F.G. Whoriskey, *Aerial exposure tolerance off zebra and quagga mussels (Bivalvia: Dreissenidae): implications for overland dispersal*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1995. **52**(3): p. 470-477.
27. Hedge, L.H., W.A. O'Connor, and E.L. Johnston, *Manipulating the intrinsic parameters of propagule pressure: implications for bio-invasion*. Ecosphere, 2012. **3**(6): p. art48.
28. Pimentel, D., R. Zuniga, and D. Morrison, *Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States*. Ecological Economics, 2005. **52**(3): p. 273-288.
29. Picard, I. and S. Doyon, *Vérification de la présence de moules zébrée dans la Baie de Magog au Lac Memphrémagog et première évaluation de l'état de la situation*. 2018, Étude réalisée pour Memphrémagog Conservation Inc. p. 11.
30. ILEC. *World Lake Database*. [cited 2019 2019-12-07]; Available from: <http://wldb.ilec.or.jp/Details/Lake/NAM-48>.
31. LaRocque, A. and J.-M.M. Dubois, *Memphremagog, Lake*, in *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*, L. Bengtsson, R.W. Herschy, and R.W. Fairbridge, Editors. 2012, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 516-519.
32. Laliberté, D., P. Leclerc, and I.e. Québec . Ministère de, *Étude des causes de la contamination des poissons des lacs Lovering et Massawippi par des substances toxiques résultats de la campagne d'échantillonnage réalisé en 1999*. 2000, Ministère de l'environnement: [Québec].
33. Letellier, P., *Application des modèles hydrodynamique et de qualité d'eau Delft3D au lac Massawippi*, in *Faculté de génie*. 2019, Université de Sherbrooke: Sherbrooke, Qc. p. 83.
34. Cope, W.G., M.R. Bartsch, and J.E. Hightower, *Population dynamics of zebra mussels Dreissena polymorpha (Pallas, 1771) during the initial invasion of the Upper Mississippi River, USA*. Journal of Molluscan Studies, 2006. **72**(2): p. 179-188.
35. Chen, D., et al., *Environmental factors affecting settlement of quagga mussel (Dreissena rostriformis bugensis) veligers in Lake Mead, Nevada-Arizona, USA*. Aquatic Invasions, 2011. **6**(2): p. 149-156.
36. Akçakaya, H.R., et al., *Zebra mussel demography and modeling : preliminary analysis of population data from upper midwest rivers*. 1998, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station: Vicksburg, Miss.
37. Martel, A., *Demography and growth of the exotic zebra mussel (Dreissena polymorpha) in the Rideau River (Ontario)*. Canadian Journal of Zoology, 1995. **73**(12): p. 2244-2250.
38. Douglas Hunter, R. and K.A. Simons, *Dreissenids in Lake St. Clair in 2001: Evidence for Population Regulation*. Journal of Great Lakes Research, 2004. **30**(4): p. 528-537.
39. Jantz, B. and D. Neumann, *Growth and Reproductive Cycle of the Zebra Mussel in the River Rhine as Studied in a River Bypass*. Oecologia, 1998. **114**(2): p. 213-225.

40. Churchill, C. and D. Quigley, *Downstream dispersal of zebra mussels (Dreissena polymorpha) under different flow conditions in a coupled lake-stream ecosystem*. Biological Invasions, 2017. **20**: p. 1-15.
41. Horvath, T. and G. Lamberti, *Mortality of zebra mussel, Dreissena polymorpha, veligers during downstream transport*. Freshwater Biology, 1999. **42**: p. 69-76.
42. Jones, L.A. and A. Ricciardi, *Influence of physicochemical factors on the distribution and biomass of invasive mussels (Dreissena polymorpha and Dreissena bugensis) in the St. Lawrence River*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005. **62**(9): p. 1953-1962.
43. Mellina, E. and J.B. Rasmussen, *Patterns in the Distribution and Abundance of Zebra Mussel (Dreissena polymorpha) in Rivers and Lakes in Relation to Substrate and Other Physicochemical Factors*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994. **51**(5): p. 1024-1036.
44. Tošenovský, E. and J. Kobak, *Impact of abiotic factors on aggregation behaviour of the zebra mussel Dreissena polymorpha*. Journal of Molluscan Studies, 2015. **82**(1): p. 55-66.
45. Naddafi, R., et al., *Physicochemical properties determine zebra mussel invasion success in lakes*. Hydrobiologia, 2011. **669**: p. 227–236.
46. Naddafi, R., K. Pettersson, and P. Eklov, *Predation and physical environment structure the density and population size structure of zebra mussels*. Journal of the North American Benthological Society, 2010. **29**(2): p. 444-453.
47. Baldwin, B.S., et al., *Low dissolved ions may limit secondary invasion of inland waters by exotic round gobies and dreissenid mussels in North America*. Biological Invasions, 2012. **14**(6): p. 1157-1175.
48. Hincks, S.S. and G.L. Mackie, *Effects of pH, calcium, alkalinity, hardness, and chlorophyll on the survival, growth, and reproductive success of zebra mussel (Dreissena polymorpha) in Ontario lakes*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997. **54**(9): p. 2049-2057.
49. Whittier, T., et al., *A calcium-based invasion risk assessment for zebra and quagga mussels (Dreissena spp)*. Frontiers in Ecology and The Environment - FRONT ECOL ENVIRON, 2008. **6**: p. 180-184.
50. Martel, A.L. and J.B. Madill, *Twenty-six years (1990-2015) of monitoring annual recruitment of the invasive zebra mussel (Dreissena polymorpha) in the Rideau River, a small river system in Eastern Ontario, Canada*. Canadian Journal of Zoology, 2018. **96**(10): p. 1071-1079.
51. JOKELA, A. and A. RICCIARDI, *Predicting zebra mussel fouling on native mussels from physicochemical variables*. Freshwater Biology, 2008. **53**(9): p. 1845-1856.
52. Thorp, J., et al., *Responses of Ohio River and Lake Erie dreissenid molluscs to changes in temperature and turbidity*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011. **55**: p. 220-229.
53. Sorba, E.A. and D.A. Williamson, *Zebra Mussel Colonization Potential in Manitoba, Canada*, W.Q.M.S.M. Environment, Editor. 1997.
54. Boelman, S.F., Neilson, F. M., Dardeau, E. A., Jr., and Cross, T. , *Zebra Mussel (Dreissena polymorpha) Control Handbook for Facility Operators. Misc. Paper EL-97-1*, . 1997, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
55. Che, C.S.L. *Prospecting operations and tests of manual and mechanical extraction of zebra mussel in the Mequinenza and Ribarroja reservoirs*. . 2004 [cited 2019 2019-12-05]; Available from: http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/mejillon/en_inicio.htm.
56. Wimbush, J., et al., *Eradication of colonizing populations of zebra mussels (Dreissena polymorpha) by early detection and SCUBA removal: Lake George, NY*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2009. **19**(6): p. 703-713.

57. Londo, A.R., *Zebra Mussel (Dreissena polymorpha) Habitat Associations in Four West-Central Minnesota Lakes*, in *Biological Sciences*. 2015, Minnesota State University.
58. Jenner, H., H. Polman, and R. Wijck, *Four years experience with a new chlorine dosing regime against macro fouling*. 2004. **84**: p. 28-30+6.
59. Grazio, J.L. and G. Montz. *Winter lake drawdown as a strategy for zebra mussel (Dreissena polymorpha) control: results of pilot studies in Minnesota and Pennsylvania*. . in *Proceedings 11th International Conference on Aquatic Invasive Species*. 2002. US Army Engineer Research and Development Center, Alexandria (Virginia).
60. Durán, C., et al., *Management strategies for the zebra mussel invasion in the Ebro River basin*. *Aquatic Invasions*, 2010. **5**: p. 309-316.
61. Enders, E., et al., *Distribution patterns of the early invasion of zebra mussels, Dreissena polymorpha (Pallas, 1771), in the south basin of Lake Winnipeg*. *BioInvasions Records*, 2019. **8**: p. 329-342.
62. Ricciardi, A., *Predicting the impacts of an introduced species from its invasion history: an empirical approach applied to zebra mussel invasions*. *Freshwater Biology*, 2003. **48**(6): p. 972-981.
63. Naddafi, R., K. Pettersson, and P. Eklöv, *Effects of the zebra mussel, an exotic freshwater species, on seston stoichiometry*. *Limnology and Oceanography*, 2008. **53**(5): p. 1973-1987.
64. Burlakova, L.E., A.Y. Karatayev, and D.K. Padilla, *Changes in the distribution and abundance of *Dreissena polymorpha* within lakes through time*. *Hydrobiologia : The International Journal of Aquatic Sciences*, 2006. **571**(1): p. 133-146.
65. Timar, L. and D.J. Phaneuf, *Modeling the human-induced spread of an aquatic invasive: The case of the zebra mussel*. *Ecological Economics*, 2009. **68**(12): p. 3060-3071.
66. Karatayev, A.Y., et al., *Predicting the spread of aquatic invaders: insight from 200 years of invasion by zebra mussels*. *Ecological Applications*, 2015. **25**(2): p. 430-440.