



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2022/055

Région de la capitale nationale

Traitements et protocoles « Lavez, Videz, Séchez et Décontaminez » pour prévenir l'introduction et la propagation des espèces aquatiques envahissantes

A.M. Weise, N. Simard, V. Massé-Beaulne et J.M. Hill

Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4
Canada

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien des avis scientifiques
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

[http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/
csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca](http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca)



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du
ministère des Pêches et des Océans, 2022

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-45266-1 N° cat. Fs70-5/2022-055F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Weise, A.M., Simard, N., Massé-Beaulne, V. et Hill, J.M. 2022. Traitements et protocoles « Lavez, Videz, Séchez et Décontaminez » pour prévenir l'introduction et la propagation des espèces aquatiques envahissantes. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/055. xi + 104 p.

Also available in English :

Weise, A.M., Simard, N., Massé-Beaulne, V. and Hill, J.M. 2022. "Clean, Drain, Dry, and Decontaminate" treatments and protocols to prevent the introduction and spread of aquatic invasive species. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2022/055. x + 91 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	viii
GLOSSAIRE	ix
1. INTRODUCTION	1
2. MÉTHODES.....	3
2.1. REVUE DE LITTÉRATURE DE L'EFFICACITÉ DES TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES ET D'EAU DOUCE	4
2.2. REVUE DE LITTÉRATURE DES PROTOCOLES LVS+D ADOPTÉS EN AMÉRIQUE DU NORD.....	6
3. RÉSULTATS.....	6
3.1. ÉVALUATION DE LA MORTALITÉ.....	6
3.2. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION PHYSIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES D'EAU DOUCE.....	7
3.2.1. Immersion dans de l'eau chaude	7
3.2.2. Lavage sous pression	8
3.2.3. Séchage à l'air	10
3.2.4. Congélation.....	12
3.3. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION CHIMIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES D'EAU DOUCE.....	12
3.3.1. Hypochlorite de sodium (eau de Javel, hypochlorite de sodium à 5 %)	12
3.3.2. Acide acétique (vinaigre, acide acétique à 5 %)	13
3.3.3. Composés d'ammonium quaternaire	13
3.3.4. Eau salée (chlorure de sodium et chlorure de potassium).....	14
3.3.5. Virkon ^{MD}	15
3.4. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION PHYSIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES	15
3.4.1. Immersion dans de l'eau douce ou lavage au jet d'eau douce	15
3.4.2. Immersion dans de l'eau de mer chaude ou de l'eau douce	17
3.4.3. Lavage sous pression (jets à basse et haute pression).....	18
3.4.4. Séchage à l'air	18
3.5. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION CHIMIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES	20
3.5.1. Hypochlorite de sodium (eau de Javel, hypochlorite de sodium à 5 %)	20
3.5.2. Acide acétique (vinaigre, acide acétique à 5 %)	21
3.5.3. Solutions de saumure	22
3.5.4. Chaux hydratée.....	23
3.6. PROTOCOLES LVS+D UTILISÉS AU CANADA ET AILLEURS	24
3.6.1. Protocoles de décontamination pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce	25
3.6.2. Protocoles de décontamination pour les espèces aquatiques envahissantes marines	28

4. DISCUSSION.....	30
4.1. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION LÉTAUX POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES D'EAU DOUCE.....	30
4.2. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION LÉTAUX POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES	35
4.3. LIMITES ET SOURCES D'INCERTITUDE	40
4.4. COMPATIBILITÉ ET FAISABILITÉ.....	42
4.5. IMPORTANCE DES PROGRAMMES LVS, D'INSPECTION DES EMBARCATIONS ET DE DÉCONTAMINATION	45
4.6. AUTRES CONSIDÉRATIONS	46
5. CONCLUSIONS.....	47
6. REMERCIEMENTS	48
7. RÉFÉRENCES CITÉES	49
8. TABLEAUX	67
ANNEXE 1. TERMES DE RECHERCHE	104

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1. Récapitulatif des espèces aquatiques envahissantes marines et d'eau douce qui ont été évaluées dans le cadre du présent travail.67
- Tableau 2. Calcul de la cote d'incertitude associée à chaque traitement de décontamination efficace pour tuer le plus grand nombre d'espèces aquatiques envahissantes d'eau douce ou marines ciblées. Un niveau d'incertitude a été attribué à chaque option de traitement de décontamination par espèce, et une cote a été attribuée en fonction du nombre d'études disponibles (peu nombreuses, limitées, nombreuses ou exhaustives), de leur qualité (communication personnelle, rapport technique ou étude examinée par des pairs), ainsi que de leur concordance avec l'option de traitement efficace indiquée (conclusions contradictoires, différentes, généralement en accord ou en accord). Une cote d'incertitude n'a pas été calculée pour les traitements inefficaces. La cote finale est fondée sur la somme des cotes obtenus pour les sources de données, leur qualité et leur accord avec l'option de traitement de décontamination indiquée.68
- Tableau 3. Efficacité des traitements de décontamination physiques pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée, précisée ci-après par stade biologique, dans la mesure du possible. Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, HR : humidité relative, * : rapports techniques, Δ : expériences en laboratoire d'acclimatation. ** Les durées létales de séchage à l'air dépendent de l'humidité relative et de la taille (par exemple, moules de la famille des dreissenidés). Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.69
- Tableau 4. Efficacité des traitements de décontamination chimiques pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée. Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, HR : humidité relative, * : rapports techniques, Δ : expériences en laboratoire d'acclimatation, § désigne des études qui ont utilisé des oxydants chlorés plutôt que de l'hypochlorite de sodium. Tous les traitements étaient des immersions, sauf indication contraire. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.....74
- Tableau 5. Efficacité des traitements de décontamination physiques pour les espèces aquatiques envahissantes marines; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée chez les organismes adultes (sauf pour *Mytilus edulis*, espèce pour laquelle les stades d'adulte et de juvénile sont présentés). Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, * : rapports techniques, Δ : expériences de laboratoire d'acclimatation, a : *Mytilus galloprovincialis* et b : *Ciona savignyi*. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.79
- Tableau 6. Efficacité des traitements de décontamination chimiques (hypochlorite de sodium et acide acétique) pour les espèces aquatiques envahissantes marines; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée chez les organismes adultes (sauf pour *Mytilus edulis*, espèce pour laquelle les stades d'adulte et de juvénile sont présentés). Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, * : rapports techniques, a : *Botrylloides leachii*, b : végétales et c : acide acétique à

10 %. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.....84

Tableau 7. Efficacité des traitements de décontamination chimiques (saumure et chaux hydratée) pour les espèces aquatiques envahissantes marines; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée chez les organismes adultes (sauf pour *Mytilus edulis*, espèce pour laquelle les stades d'adulte et de juvénile sont présentés). Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, * : rapports techniques, a : *Botrylloides leachii*. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.....87

Tableau 8. Traitements de décontamination recommandés pour les embarcations de plaisance et l'équipement au Canada et dans certains États américains pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce. Basse pression : débit d'un boyau d'arrosage; IDE : programmes d'inspection et de décontamination des embarcations gérés par les provinces et les États; NS : non spécifié. Les références sont indiquées en exposant. Les concentrations de produits dans les protocoles ont été converties en concentrations chimiques au besoin pour permettre des comparaisons avec la littérature scientifique citée dans le tableau 4 (voir les notes ci-après)...90

Tableau 9. Récapitulatif des traitements de décontamination des embarcations efficaces pour tuer le plus grand nombre d'espèces aquatiques envahissantes d'eau douce ciblées. Les traitements efficaces (mortalité $\geq 99\%$) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour la moule zébrée (MZ), la moule quagga (MQ), la petite corbeille d'Asie (PCA), la nasse de Nouvelle-Zélande (NN-Z), la crevette tueuse (CT), la crevette rouge sang (CRS), les cladocères (CL), les macrophytes (MP) et *Myxobolus cerebralis*, qui cause la maladie du tournis (MdT). Les niveaux d'incertitude correspondants sont fondés sur la quantité de données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculés pour les traitements inefficaces.....93

Tableau 10. Récapitulatif des traitements de décontamination de l'équipement efficaces pour tuer le plus grand nombre d'espèces aquatiques envahissantes d'eau douce ciblées. Les traitements efficaces (mortalité $\geq 99\%$) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour la moule zébrée (MZ), la moule quagga (MQ), la petite corbeille d'Asie (PCA), la nasse de Nouvelle-Zélande (NN-Z), la crevette tueuse (CT), la crevette rouge sang (CRS), les cladocères (CL), les macrophytes (MP) et *Myxobolus cerebralis*, qui cause la maladie du tournis (MdT). Les niveaux d'incertitude correspondants sont fondés sur la quantité de données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculés pour les traitements inefficaces.....94

Tableau 11. Récapitulatif des traitements de décontamination des embarcations pour les espèces aquatiques envahissantes marines. Les traitements efficaces (mortalité $\geq 99\%$) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour les tuniciers coloniaux (TC), les tuniciers solitaires (TS), la moule bleue (MB), le crabe vert (CV), *Codium fragile* (CF) et les macroalgues (MA). Les niveaux d'incertitude correspondants sont indiqués et sont fondés sur les données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculés pour les traitements inefficaces.95

Tableau 12. Récapitulatif des traitements de décontamination de l'équipement pour les espèces aquatiques envahissantes marines. Les traitements efficaces (mortalité ≥ 99 %) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour les tuniciers coloniaux (TC), les tuniciers solitaires (TS), la moule bleue (MB), le crabe vert (CV), *Codium fragile* (CF) et les macroalgues (MA). Les niveaux d'incertitude correspondants sont indiqués et sont fondés sur les données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculés pour les traitements inefficaces. 96

Tableau 13. Récapitulatif des compatibilités/incompatibilités des traitements de décontamination avec divers matériaux (fibre de verre, plastique, métal, tissu, caoutchouc, néoprène et tapis), ainsi que de leurs avantages et inconvénients généraux. Les références sont indiquées en exposant. * : rapports techniques, NS : non spécifié. 98

Tableau 14. Faisabilité des traitements de décontamination du point de vue pratique, des exigences en matière d'équipement, des risques pour la santé humaine et l'écosystème, ainsi que de l'élimination. 102

RÉSUMÉ

Les espèces aquatiques envahissantes (EAE) représentent une menace importante pour les eaux douces, estuariennes et marines du Canada et menacent la biodiversité, l'économie et la société du pays. Pour prévenir l'introduction et la propagation des EAE par les activités commerciales et récréatives en milieu aquatique, de nombreuses organisations gouvernementales et non gouvernementales encouragent les propriétaires et les conducteurs à laver, vider et sécher (LVS) volontairement leurs embarcations, leurs remorques et leur équipement. Dans certains cas, il est possible d'appliquer une étape supplémentaire de décontamination (LVS+D) qui comporte des paramètres de traitement propres à l'espèce en vue de tuer et/ou d'éliminer les EAE. À ce jour, il n'y a pas eu d'évaluation complète de l'efficacité des protocoles LVS+D utilisés au Canada pour les EAE en milieu marin et dulcicole. Ce document de recherche présente un examen, par espèce, des traitements de décontamination efficaces identifiés dans la littérature scientifique et propose des lignes directrices sur les traitements visant à tuer le plus grand nombre d'EAE ciblées. L'efficacité des traitements de décontamination recommandés dans les protocoles LVS+D d'eau douce et marins utilisés pour la gestion des EAE au Canada ou à l'étranger ont également été évaluées. Les traitements de décontamination létaux pour des EAE d'intérêt appartenant à différents groupes fonctionnels et taxonomiques (par exemple, bivalves, gastropodes, zooplancton, macrophytes, macroalgues, crabes et tuniciers) ont été évalués et comprenaient des méthodes physiques (jets ou immersions dans l'eau chaude, lavage sous pression, séchage à l'air et congélation) et chimiques (jets ou immersions dans l'hypochlorite de sodium, l'acide acétique, des composés d'ammonium quaternaire, l'eau salée, le Virkon^{MD}, la saumure et la chaux hydratée) ou une combinaison de ces traitements. La littérature scientifique a montré que plusieurs traitements de décontamination peuvent être mortels pour les EAE, mais seulement s'ils sont appliqués pendant des périodes et dans des conditions d'exposition précises. Les recommandations formulées dans les protocoles gouvernementaux ou d'États reflétaient essentiellement la littérature scientifique et soulignent qu'il faudrait continuer à soutenir les campagnes de LVS dans tout le pays. Dans certains cas, lorsqu'une décontamination supplémentaire est requise (par exemple, une embarcation présente un risque élevé de transporter des EAE), il peut être nécessaire d'ajuster la température, la pression ou le traitement chimique pour parvenir à une mortalité de 100% d'un plus grand nombre des EAE ciblées. Bien que de nombreux traitements de décontamination propres à l'espèce ou à l'environnement aient été jugés efficaces pour tuer ou éliminer les EAE, aucun traitement de décontamination unique ne s'appliquait à l'ensemble des EAE d'eau douce et marines ni à l'ensemble des embarcations et de l'équipement. Les résultats de cette étude aideront à élaborer des recommandations nationales sur les traitements LVS+D et à fournir des avis aux programmes de réglementation de Pêches et Océans Canada et au public canadien.

GLOSSAIRE¹

Aire de répartition naturelle : Région géographique d'où provient une espèce.

Congélation : Traitement de décontamination s'il est utilisé dans des conditions précises (par exemple, température et durée d'exposition) qui sont létales pour les espèces aquatiques envahissantes ciblées. Les petits équipements peuvent être congelés dans un congélateur, tandis que les embarcations (et les gros équipements) peuvent être congelés lorsqu'ils sont retirés de l'eau et laissés à l'extérieur quand la température de l'air en hiver est inférieure au point de congélation.

Décontamination : Traitement visant à tuer, à détruire ou à éliminer des espèces aquatiques envahissantes afin de prévenir leur propagation dans les eaux canadiennes. La décontamination peut être effectuée au moyen d'un traitement physique ou chimique qui est spécifiquement paramétré (par exemple, durée d'exposition, concentrations chimiques, température) pour assurer la mortalité des espèces ciblées.

Efficacité : Niveau auquel un traitement de décontamination peut tuer une espèce envahissante ciblée. L'efficacité est exprimée quantitativement (en pourcentage de mortalité ou d'élimination) ou qualitativement (efficace ou non efficace). Dans les travaux en question, les décontaminations physiques et chimiques ont été classées comme efficaces si les traitements entraînaient une mortalité d'au moins 99 %.

Élimination : Désigne l'élimination des organismes des embarcations et de l'équipement par le nettoyage, le raclage, l'essuyage ou le lavage sous pression. L'élimination des espèces aquatiques envahissantes ne garantit pas leur mortalité.

Embarcation : Bâtiment motorisé ou non qui se déplace dans ou sur l'eau. Les embarcations peuvent être des bateaux, des canots, des kayaks, des planches à pagaie, etc. Dans le cadre des travaux en question, elles étaient limitées aux embarcations de moins de 24 m de longueur.

Équipement : Tout matériel ou engin qui entre en contact avec l'eau. Il peut s'agir d'articles qui sont portés ou utilisés sur une embarcation (équipement de sécurité comme des vêtements de flottaison individuels, et accessoires comme des ancres, des pagaies, des cordes, des cuissardes, des bottes, des filets, des seaux, des glacières, du matériel scientifique, des objets pneumatiques, des jouets de plage, etc.) pour des activités liées à l'eau (par exemple, navigation de plaisance, pêche, canotage, plongée sous-marine, natation, chasse).

Espèce indigène : Espèce qui se trouve naturellement dans une zone ou un habitat donné (c'est-à-dire son aire de répartition historique), par opposition à une espèce introduite ou à une espèce envahissante.

Espèce non indigène (ENI) : Plante, animal ou microorganisme présent dans une zone à l'extérieur de son habitat naturel ou aire de répartition connu, qui peut produire des effets nuisibles sur l'environnement, la santé humaine ou l'économie après son introduction, son établissement ou sa propagation dans un nouvel écosystème. Les termes « espèce envahissante », « espèce étrangère », « espèce nuisible », « envahisseur », « espèce exotique » et « espèce introduite » sont utilisés comme synonymes dans la littérature.

¹ Certaines définitions sont reproduites ou modifiées du [Plan d'action canadien de lutte contre les espèces aquatiques envahissantes](#) (septembre 2004) et du document [Uniform Minimum Protocols and Standards for Watercraft Inspection and Decontamination Programs for Dreissenid Mussels in the Western United States \(UMPS IV\)](#) [Elwell et Phillips 2021; en anglais seulement].

Espèce aquatique envahissante (EAE) : Espèce aquatique non indigène (une espèce de poisson, d'animal ou de plante) qui a un impact négatif sur l'environnement, la santé humaine ou l'économie après son introduction, son établissement ou sa propagation dans un nouvel écosystème. Les termes « espèce aquatique exotique envahissante », « espèce nuisible », « envahisseur », « espèce exotique » et « espèce introduite » sont utilisés comme synonymes dans la littérature.

Immersion : Traitement de décontamination s'il est utilisé dans des conditions précises (par exemple, concentration et durée d'exposition) qui sont létales pour les espèces aquatiques envahissantes ciblées. Les ouvrages scientifiques présentent des cas où des individus ou des grappes d'espèces aquatiques envahissantes ont été complètement submergés dans de l'eau froide ou chaude ou des solutions chimiques. Ces immersions sont particulièrement utiles pour les petits équipements, mais les « cuves d'immersion » récemment mises au point, c'est-à-dire de grands réservoirs d'eau chaude dans lesquels les plaisanciers peuvent faire reculer leur embarcation, peuvent permettre d'appliquer ce traitement aux embarcations.

Introduction primaire : Première introduction d'une espèce envahissante dans un écosystème où il n'est pas naturellement présent.

Lavage sous pression : Traitement de décontamination (jet d'eau douce ou d'eau de mer) s'il est utilisé dans des conditions précises (par exemple, pression du jet d'eau, température et durée d'exposition) permettant d'éliminer ou de tuer les espèces aquatiques envahissantes ciblées. Dans le présent document, le lavage à basse pression désigne les jets à une pression de l'eau inférieure à 60 lb/po² (par exemple, les boyaux d'arrosage) et les jets à haute pression ont une pression supérieure à 400 lb/po². L'eau peut être chauffée pour accroître l'efficacité (c'est-à-dire la mortalité des espèces aquatiques envahissantes) du lavage sous pression.

Lavez, Videz, Séchez (LVS) : Campagnes visant à accroître la sensibilisation aux espèces aquatiques envahissantes et à encourager le public à prendre des mesures volontaires pour réduire la probabilité de transporter des espèces aquatiques envahissantes lors du déplacement d'embarcations de plaisance et d'équipement entre des plans d'eau. Ces trois étapes séquentielles réfèrent à :

- **Laver :** Inspecter, enlever et nettoyer les plantes, les animaux, la boue, la saleté, les débris, les dépôts de surface de toutes les pièces (intérieures et extérieures) d'une embarcation, de la remorque et de l'équipement.
- **Vider :** Vider les viviers pour les prises ou les appâts, les compartiments de stockage, les cales, les compartiments moteur, les ponts, les citernes de ballast, les systèmes de stockage et de distribution de l'eau, les refroidisseurs ou autres aires de stockage de l'eau de l'embarcation, de la remorque, du moteur ou de l'équipement sur la terre ferme.
- **Sécher :** Sécher toutes les pièces (intérieures et extérieures), la remorque et l'équipement avant de les mettre à l'eau dans un autre plan d'eau. Pas d'eau stagnante. Le séchage peut se faire soit par séchage à l'air sur plusieurs jours, soit à l'aide d'une serviette, d'un aspirateur pour débris secs ou liquides ou d'air sous pression.

Mortalité : Mort d'un organisme. La mortalité est atteinte lorsque l'organisme est mort et n'affiche aucun signe de mouvement ou d'activité vitale (par exemple, arrêt de la croissance, alimentation, réaction à la stimulation tactile ou réduction de la biomasse). La mortalité est exprimée en pourcentage.

Pression de propagule : En écologie de l'invasion, la pression de propagule fait référence à l'effort d'introduction représenté par le nombre et la fréquence des événements de rejet des propagules introduites dans une nouvelle zone (non envahie). Elle comprend des estimations

du nombre absolu d'individus impliqués dans un événement de rejet (taille des propagules) et du nombre d'événements de rejets individuels (nombre de propagules). À mesure que le nombre de rejets ou d'individus rejetés augmente, la pression de propagule augmente également.

Propagation secondaire : Lorsqu'une espèce envahissante étend son aire de répartition géographique après l'invasion initiale. La propagation secondaire peut être facilitée par des activités anthropiques comme la navigation de plaisance, le transfert de mollusques et de crustacés et le commerce d'organismes destinés aux aquariums.

Propagule : Tout matériel (par exemple, semence, spore, larve) servant à propager un organisme au stade suivant de son cycle biologique.

Séchage à l'air : Traitement de décontamination s'il est utilisé dans des conditions précises (par exemple, température et durée d'exposition) qui sont létales pour les espèces aquatiques envahissantes ciblées. Ce traitement peut être utilisé seul ou combiné à d'autres pour en améliorer l'efficacité (par exemple, eau chaude, immersion dans un produit chimique). Étant donné que les méthodologies varient d'une étude à l'autre, le séchage à l'air peut faire référence au séchage des organismes en laboratoire ou à l'extérieur (lumière solaire directe ou indirecte), exposés individuellement ou en grappes, sur des tables ou en suspension (par exemple, boudins de moules), etc. Les termes « exposition à l'air », « exposition aérienne » et « séchage » sont des synonymes utilisés dans la littérature.

Vecteur : Moyen physique par lequel une espèce envahissante est transportée d'une zone à une autre. Un vecteur peut être d'origine naturelle (par exemple, le vent, les courants et les animaux) ou anthropique (par exemple, l'eau de ballast, les biosalissures de la coque, l'aquaculture et le commerce d'organismes destinés aux aquariums).

Voie (d'introduction ou de propagation) : Une ou plusieurs voies par lesquelles une espèce envahissante passe d'un écosystème à un autre.

1. INTRODUCTION

L'établissement d'espèces envahissantes dans les écosystèmes aquatiques est considéré comme l'un des principaux facteurs mondiaux de la perte de biodiversité, avec de graves conséquences sur les fonctions écologiques et écosystémiques (Mack *et al.* 2000; Clavero et García-Berthou 2005; Costello *et al.* 2010; Simberloff *et al.* 2013; Gallardo *et al.* 2019). La plupart des régions de la planète ont été envahies par des espèces non indigènes (Vitousek *et al.* 1996); ces invasions peuvent, en grande majorité, être attribuées aux activités anthropiques associées à l'intensification de la mondialisation et du commerce, créant un plus grand éventail de voies d'introduction (Ricciardi 2006; Hulme 2009). Ces invasions se produisent maintenant à des échelles temporelles et spatiales sans précédent (Ruiz *et al.* 2000; Ricciardi 2006, 2007), et sont souvent influencées par des facteurs environnementaux et socioéconomiques (Mills *et al.* 1993, 1994; Ricciardi 2006). Les effets écologiques des espèces envahissantes peuvent avoir des impacts à plusieurs niveaux organisationnels et trophiques (Brennan *et al.* 2014; Jackson 2015; Jackson *et al.* 2017) et inclure des changements de comportement chez les espèces indigènes (Jackson *et al.* 2017; Langkilde *et al.* 2017), des altérations de l'habitat (Scheffer 2009; Strayer 2012; Simberloff *et al.* 2013), des modifications des réseaux trophiques et des dépendances trophiques (Vander Zanden *et al.* 1999; Strayer 2010) et, dans certains cas, la disparition du biote indigène (Lodge et Shrader-Frechette 2003; Simon et Townsend 2003). De plus, avec la progression des changements climatiques, la gestion des espèces envahissantes et de leurs répercussions devient encore plus difficile, car les aires de répartition géographiques de certaines espèces envahissantes devraient changer à mesure que le climat se réchauffe (Dukes et Mooney 1999; Bradley *et al.* 2010), et les agents de stress liés aux changements climatiques (Bellard *et al.* 2013) et les extrêmes climatiques (Diez *et al.* 2012) créent de nouvelles possibilités permettant aux espèces introduites de s'établir et de prospérer (Beaury *et al.* 2020). Les espèces aquatiques envahissantes (EAE) qui sont introduites ou qui se propagent au-delà de leur aire de répartition naturelle peuvent constituer une menace pour la biodiversité, l'économie et la société du Canada.

L'histoire documentée des invasions en Amérique du Nord s'étend sur environ deux siècles et inclut différents vecteurs ou voies d'invasion, le plus important à notre époque étant le rejet d'eaux de ballast par les navires océaniques (Mills *et al.* 1993; Ricciardi 2006; Kelly 2007; Bailey 2015). Le rejet d'eaux de ballast a entraîné l'introduction primaire de nombreuses EAE, aussi appelées espèces non indigènes, dans le monde entier; en réaction, il y a eu un mouvement mondial vers la réglementation du rejet des eaux de ballast (David 2015; Chan et Briski 2017), qui a débouché sur une Convention internationale de 2004 pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments des navires, mise en œuvre en 2017 (Organisation maritime internationale 2004). Il est essentiel de gérer et de contrôler les voies d'introduction des EAE pour protéger et conserver les écosystèmes aquatiques (Mack *et al.* 2000; Ricciardi 2007; Blackburn *et al.* 2011; Saul *et al.* 2017); mais, les introductions par le biais de relâchements volontaires et de compassion, les extensions des aires de répartition résultant d'une dispersion naturelle, les salissures sur les coques et la navigation de plaisance peuvent compliquer la gestion des espèces envahissantes (par exemple, Ricciardi *et al.* 1995; Johnson *et al.* 2001; Magellan 2020). On a déterminé en particulier que la navigation de plaisance et les salissures sur les coques sont des vecteurs importants contribuant à la propagation et à l'établissement des EAE, marines et d'eau douce (Johnson *et al.* 2001; Rothlisberger *et al.* 2010; Clarke Murray *et al.* 2011; Lacoursière-Roussel *et al.* 2012; Kelly *et al.* 2013; Pelletier-Rousseau *et al.* 2019; Mohit *et al.* 2021). Les activités commerciales et récréatives en milieu aquatique (par exemple, la plongée sous-marine, la navigation de plaisance, la pêche, le canotage, la natation) peuvent mener au transport involontaire d'EAE dans de nouveaux endroits si les organismes sont fixés sur les embarcations, les remorques et l'équipement (par

exemple, petit équipement en contact avec l'eau, notamment : bottes, cuissardes, cannes à pêche, objets pneumatiques, motomarines, kayaks) ou s'ils sont transportés dans de l'eau stagnante (par exemple, eau de cale et vivier). Par conséquent, si elles ne sont pas déjà en pratique, toutes les stratégies futures de gestion des EAE devraient tenir compte d'un certain type de lignes directrices et de règlements sur le nettoyage des embarcations de plaisance et de l'équipement, afin de réduire la propagation par l'intermédiaire de cet équipement (Rothlisberger *et al.* 2010; Kelly *et al.* 2013; Pelletier-Rousseau *et al.* 2019; Mohit *et al.* 2021).

Dans la plupart des provinces canadiennes, les utilisateurs récréatifs de ressources aquatiques (principalement en eau douce) sont encouragés à prendre des mesures volontaires pour réduire la probabilité de transporter des espèces exotiques envahissantes lorsqu'ils déplacent des embarcations et de l'équipement entre des plans d'eau; ces mesures sont les étapes séquentielles « Lavez, Videz et Séchez » (LVS; par exemple, Conseil canadien sur les espèces envahissantes 2021). Des campagnes de sensibilisation semblables existent à l'échelle mondiale (par exemple, New Zealand Government 2020 et Great Britain Non-Native Species Secretariat 2021) pour prévenir la propagation des EAE lors des déplacements entre des voies navigables. Les lignes directrices sur les protocoles LVS se veulent concises et faciles à suivre, afin d'encourager la participation du grand public. Bien que les lignes directrices au Canada puissent varier d'une région et d'une organisation à l'autre, elles comprennent généralement les étapes ci-dessous.

La première étape, « Lavez », consiste à inspecter et à nettoyer l'embarcation, la remorque et l'équipement qui est entré en contact avec un plan d'eau. Tous les fragments de plantes, les animaux, la boue et les autres débris organiques visibles doivent être enlevés et éliminés sur terre. L'embarcation, la remorque et l'équipement doivent être lavés, frottés ou rincés. Tous les petits articles qui peuvent être immergés doivent être nettoyés à la main sur place. L'étape du lavage doit être effectuée sur la terre ferme, loin des égouts pluviaux, des fossés ou des voies navigables, afin de limiter les risques de réintroduction d'organismes dans les écosystèmes aquatiques. Il faut éviter les lave-autos locaux si des EAE sont présentes, car celles-ci pourraient revenir dans l'environnement par les systèmes de drainage municipaux.

La deuxième étape, « Videz », consiste à drainer toute l'eau de l'embarcation, de la remorque et de l'équipement. Cela comprend le drainage de tous les espaces ou articles qui peuvent retenir l'eau, comme les compartiments internes (ballasts, cales, viviers, etc.) et l'équipement (glacières, seaux à appâts, cordes, etc.). L'eau doit être évacuée des moteurs et l'embarcation doit être inclinée lorsqu'elle est entreposée pour permettre à la cale de se vider. En Alberta, au Manitoba et en Saskatchewan, il est illégal de transporter des embarcations entre des plans d'eau avec le bouchon de vidange en place.

La troisième étape, « Séchez », consiste à assécher complètement toutes les parties de l'embarcation et de l'équipement et à s'assurer qu'il ne reste pas d'eau stagnante. Le séchage peut se faire soit par séchage à l'air sur plusieurs jours, soit à l'aide d'une serviette, d'un aspirateur pour débris secs ou liquides ou d'air sous pression. Tout doit être sec au toucher avant d'entrer dans un nouveau plan d'eau.

Dans les situations où il existe un risque défini (ou un risque élevé) qu'une embarcation ou un équipement puisse transporter des EAE, l'étape supplémentaire « Décontaminez » peut être appliquée (LVS+D), qui comprend une température, une pression ou un traitement chimique ou une combinaison de ces éléments. Le protocole LVS+D dépend de l'espèce ciblée, du type d'embarcation ou d'équipement à désinfecter et est souvent (mais pas toujours) effectué par du personnel formé avec de l'équipement spécialisé.

Les protocoles LVS et LVS+D ne sont pas mutuellement exclusifs et, dans certains cas, contiennent des éléments similaires. Par exemple, le séchage est implicite dans les protocoles

LVS, mais il peut aussi s'agir d'une méthode de décontamination. Bien que les protocoles LVS offrent une série de pratiques exemplaires à l'intention du public, les protocoles LVS+D ont des paramètres de traitement propres à l'espèce qui visent à assurer un niveau précis et quantifié de mortalité ou d'élimination des EAE.

À ce jour, il n'y a pas eu d'examen complet de l'efficacité des protocoles LVS+D utilisés au Canada pour les EAE marines et d'eau douce. Un examen approfondi est d'autant plus nécessaire que de nombreuses méthodes différentes sont approuvées et utilisées par diverses organisations, sans uniformité à l'échelle nationale. Visant à combler cette lacune, la présente demande d'avis scientifique émane du Programme national sur les espèces aquatiques envahissantes de Pêches et Océans Canada (MPO), le groupe de gestion responsable de la mise en œuvre de la réglementation fédérale sur les EAE à l'échelle nationale et régionale, afin d'élaborer des recommandations nationales sur les protocoles « Lavez, Videz, Séchez et Décontaminez » et d'offrir des avis aux programmes de réglementation du MPO et au public canadien.

Les objectifs pour ce document de recherche étaient les suivants :

- effectuer une revue de la littérature scientifique sur les traitements de décontamination pour éliminer ou tuer les EAE marines et d'eau douce, ainsi que sur les protocoles LVS+D en eau douce et en mer utilisés pour gérer les EAE au Canada ou à l'étranger;
- évaluer l'efficacité des traitements de décontamination et des protocoles LVS+D existants pour réduire la pression de propagule des EAE marines et d'eau douce via le transport terrestre.

La portée du projet était limitée aux embarcations de moins de 24 m de longueur, aux remorques ainsi qu'à l'équipement qui sont transférés de l'eau sur la terre avant d'entrer dans un nouveau plan d'eau (y compris l'équipement utilisé dans les ouvrages, les entreprises et les activités qui se déroulent dans l'eau), à l'exception de ceux qui restent dans l'eau. Les grands navires commerciaux (plus de 24 m de longueur) de même que l'équipement de lutte contre les incendies de forêt et les hydravions n'étaient pas visés par la portée de ces travaux.

À la suite de cet examen, les programmes de gestion des EAE pourraient déterminer des éléments communs entre les protocoles afin d'élaborer des pratiques de gestion exemplaires pour les procédures LVS+D au Canada, en vue de les appliquer dans les outils de réglementation des EAE comme les autorisations délivrées en vertu des articles 34 et 35 de la *Loi sur les pêches*, les activités de Conservation et Protection, les programmes de réglementation du MPO (Programme de protection du poisson et de son habitat, Programme sur les espèces en péril, Ports pour petits bateaux) et d'informer le grand public canadien (propriétaires et conducteurs d'embarcations de plaisance). Les avis découlant de ces travaux sur les pratiques de gestion exemplaires seront soumis à la mise en garde que l'efficacité du protocole LVS+D dépend fortement de l'adhésion et de la conformité du public, dont l'évaluation sort du cadre des travaux.

2. MÉTHODES

Nous avons effectué une revue de la littérature sur les traitements de décontamination de plusieurs EAE marines et d'eau douce, ainsi que sur les protocoles LVS+D existants. La littérature provenait de plusieurs bases de données : Web of Science (Web of Knowledge), Bibliothèque scientifique fédérale du MPO, Google Scholar (Google^{MC}) et ResearchGate. Toutes les années de publication ont été prises en compte (de la première disponible à 2021). Les publications étaient des articles revus par les pairs, des rapports et des protocoles de gouvernements et de consultants (littérature secondaire ou grise), des sites Web pertinents et

des communications personnelles ou des avis d'experts, le cas échéant. Les termes de recherche booléens (modélisés d'après Mohit *et al.* 2021) figurent à l'annexe 1.

Des espèces représentatives de différents groupes fonctionnels et taxonomiques (par exemple, bivalves, gastéropodes, zooplancton, parasites, macrophytes, macroalgues, crabes et tuniciers) ont été sélectionnées en fonction de leur présence (ou arrivée attendue) dans les milieux dulcicoles et marins du Canada (tableau 1). Dans certains cas, lorsque les données étaient limitées pour une EAE ciblée, nous avons inclus les données sur des espèces nuisibles/envahissantes d'un taxon semblable.

2.1. REVUE DE LITTÉRATURE DE L'EFFICACITÉ DES TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES ET D'EAU DOUCE

Nous avons retenu les publications si elles satisfaisaient aux critères suivants : 1) comprend une description détaillée d'un ou de plusieurs traitements de décontamination physique ou chimique utilisés pour tuer ou éliminer les EAE; 2) évalue quantitativement l'efficacité des traitements de décontamination (viabilité, mortalité, survie, élimination ou croissance); 3) est applicable à la décontamination des embarcations ou de l'équipement connexe. Nous avons exclu les études sur les enquêtes menées auprès des plaisanciers au sujet de leurs pratiques ou connaissances en matière de nettoyage, le traitement des eaux de ballast des navires commerciaux, les navires de plus de 24 m de longueur, l'équipement de lutte contre les incendies de forêt ou les hydravions, l'emballage des bateaux, les revêtements antisalissures, les traitements de décontamination dans l'eau (par exemple, au cuivre ou au zinc), l'éradication des espèces envahissantes, les modèles d'invasion et d'autres vecteurs de propagation des EAE.

Les traitements de décontamination les plus courants suivants ont été évalués pour les EAE d'eau douce (voir le glossaire).

Traitements physiques

- Eau chaude (immersion ou jet)
- Lavage sous pression
- Séchage à l'air (ou exposition à l'air)
- Congélation

Traitements chimiques (immersion)

- Hypochlorite de sodium (eau de Javel; NaClO)
- Acide acétique (CH₃COOH)
- Composés d'ammonium quaternaire (CAQ)
- Eau salée (chlorure de sodium, NaCl, et chlorure de potassium, KCl)
- Virkon^{MD} (ingrédient actif : bis(péroxymonosulfate)bis(sulfate) de pentapotassium)

Pour les espèces marines, de nombreux traitements physiques et chimiques retenus dans le cadre de cet examen provenaient d'études menées pour des activités d'aquaculture (par exemple, opérations d'introduction et de transfert). Bien qu'elles aient été élaborées à d'autres fins, nous avons considéré que ces études étaient pertinentes pour ce travail parce qu'elles évaluaient l'efficacité des traitements pour tuer les EAE et qu'elles pouvaient être appliquées

dans un contexte de LVS+D. Les traitements de décontamination les plus courants suivants ont été évalués pour les EAE marines (voir le glossaire).

Traitements physiques (parfois en combinaison avec un séchage à l'air)

- Immersion dans l'eau douce
- Eau de mer chaude ou eau douce (immersion ou jet)
- Lavage sous pression
- Séchage à l'air (ou exposition à l'air)

Traitements chimiques (immersion ou jet; parfois combinés à un séchage à l'air)

- Hypochlorite de sodium (eau de Javel; NaClO)
- Acide acétique (CH₃COOH)
- Solutions de saumure
- Chaux hydratée (CaOH)

La décontamination était définie comme un traitement physique ou chimique (ou une combinaison des deux) incluant une composante temporelle permettant d'atteindre un niveau quantifiable de mortalité ou d'élimination des EAE (par exemple, température X ou concentration X pendant X minutes). Les données ont été classées par traitement de décontamination et par EAE ciblée. Les paramètres des traitements (concentrations, durées d'exposition, températures, etc.) et les pourcentages d'élimination ou de mortalité associés ont été indiqués pour les stades de juvénile et d'adulte, lorsqu'ils sont disponibles. La plus grande partie de la littérature existante sur les traitements de décontamination portait sur la mortalité comme point final, tandis que celle sur les traitements par jet d'eau sous pression concernait la mortalité ou l'élimination. Les décontaminations physiques et chimiques ont été classées comme efficaces si les traitements entraînaient une mortalité d'au moins 99 %. Les publications faisant état d'un taux de mortalité d'au moins 99 % sont présentées en premier, avec d'autres mentionnant un taux de mortalité plus faible, suivies de certaines publications indiquant qu'un traitement est efficace sur le plan qualitatif (aucune quantité de mortalité n'est précisée). Certains traitements inefficaces ont été retenus s'ils ont donné des résultats contradictoires pour des combinaisons similaires de paramètres, si toutes les publications indiquaient qu'un traitement était inefficace ou si un traitement particulier était inefficace pour une espèce donnée. Dans certains cas, si très peu d'information était disponible pour les EAE prioritaires, des études portant sur des taxons semblables (par exemple, le contrôle des *Undaria* sp. comme substitut des macroalgues) ont été incluses.

Nous avons déterminé les options de traitement les plus efficaces qui étaient létales pour le plus grand nombre d'EAE, ainsi que les mesures de l'incertitude connexe. Des niveaux d'incertitude ont été attribués à chaque option de traitement de décontamination par espèce et stade biologique, et les cotes ont été attribuées en fonction du nombre d'études disponibles (peu nombreuses, limitées, nombreuses ou exhaustives), de leur qualité (communication personnelle, rapport technique ou étude examinée par des pairs), ainsi que de leur concordance avec les options de traitement efficaces indiquées (conclusions contradictoires, différentes, généralement en accord ou en accord; tableau 2). Ainsi, même si un traitement donné peut être jugé efficace pour une espèce en particulier, une cote d'incertitude élevée est possible lorsque peu d'études examinées par des pairs sont disponibles. De même, des cotes d'incertitude faible ou raisonnable sont présentées lorsque de nombreuses études examinées par des pairs appuient l'option de traitement efficace proposée. Les cotes d'incertitude n'ont pas été calculées pour les traitements inefficaces.

2.2. REVUE DE LITTÉRATURE DES PROTOCOLES LVS+D ADOPTÉS EN AMÉRIQUE DU NORD

Les protocoles ont été définis comme une combinaison de traitements et de lignes directrices recommandés par différents gouvernements et organismes pour éliminer ou tuer les EAE et, de ce fait, empêcher leur introduction et leur propagation. Les protocoles LVS+D ont été retenus s'ils satisfaisaient aux critères suivants : 1) le protocole était fondé sur la littérature scientifique ou contenait une liste de références; 2) la source était un rapport gouvernemental (fédéral/étatique/provincial/territorial) pertinent ou une référence juridique pertinente. Les renseignements pertinents ont été classés par source, type de traitement et EAE ciblée, ainsi que par province/État. Nous avons examiné les traitements de décontamination recommandés dans les protocoles LVS+D afin de déterminer si les protocoles existants sont appuyés par les ouvrages scientifiques.

3. RÉSULTATS

3.1. ÉVALUATION DE LA MORTALITÉ

Les paramètres de mortalité variaient entre les études, les taxons et le stade biologique de l'organisme, mais les méthodes générales d'évaluation de la viabilité et de la survie étaient comparables. Les bivalves adultes étaient considérés comme morts lorsque, après une période de récupération, les organismes ne réagissaient pas à la stimulation tactile, ne refixaient pas leurs byssus ou présentaient une ouverture prolongée de la coquille (par exemple, Harrington *et al.* 1997; Forrest et Blakemore 2006; Barbour *et al.* 2013; Stockton et Moffit 2013; Davis *et al.* 2015A; Moffit *et al.* 2015; Joyce *et al.* 2019), bien que la mort des larves véligères ait été confirmée par l'absence de mouvement ciliaire à l'intérieur de la coquille ou du velum étendu (par exemple, Verween *et al.* 2009; Haque *et al.* 2014; Moffit *et al.* 2016; Haque et Kwon 2017; Davis *et al.* 2018). La mortalité de la nasse de Nouvelle-Zélande (*antipodarum de Potamopyrgus*) était confirmée lorsque les individus dont l'opercule était fermé ne montraient aucun mouvement après 10 minutes ou lorsque le corps dépassait clairement de la coquille (Schisler *et al.* 2008; Opligner et Wagner 2011; De Stasio *et al.* 2019).

La mortalité du zooplancton était déterminée lorsque les individus étaient stationnaires, qu'il n'y avait aucune contraction musculaire des antennes ou des péréiopodes, qu'ils ne réagissaient pas aux stimuli ou qu'ils ne tenaient pas leurs péréiopodes sous leur corps après une période de récupération de 12 à 48 heures (par exemple, Sebire *et al.* 2018; De Stasio *et al.* 2019; Bradbeer *et al.* 2020).

Les crabes verts (*Carcinus maenas*) étaient considérés comme morts lorsqu'ils ne présentaient pas de rétraction réflexive des pattes lorsqu'on les tirait ou en l'absence d'activité papillaire ou des antennes antérieures (Darbyson *et al.* 2009; Best *et al.* 2014).

Les critères établissant la mortalité des plantes et des algues étaient plus variables, car plusieurs approches sont définies dans la littérature pour évaluer la survie et la viabilité après les traitements de décontamination (voir Mohit *et al.* 2021). Les techniques comprenaient le rapport de fluorescence variable/maximale des feuilles (les plantes ayant une cote inférieure à 0,3 étaient considérées comme mortes; Anderson *et al.* 2015; Shannon *et al.* 2018), l'absence de nouvelle croissance des tiges apicales, des nœuds ou des racines sur une période de 14 à 35 jours dans les traitements de récupération (Basiouny *et al.* 1978; Evans *et al.* 2011; Jerde *et al.* 2012; Bickel 2015; Bruckerhoff *et al.* 2015; Baniszewski *et al.* 2016; Crane *et al.* 2019), l'estimation visuelle de la dégradation (MacNair 2002; Jerde *et al.* 2012; Barnes *et al.* 2013; Baniszewski *et al.* 2016; Crane *et al.* 2019), la perte de biomasse ou une réduction de l'activité enzymatique (Basiouny *et al.* 1978; Watkins et Hammerschlag 1984; Blumer *et al.* 2009; Barnes

et al. 2013; Bickel 2015) et l'estimation de la probabilité que des fragments demeurent viables comme mesure du pourcentage de perte d'eau après la dessiccation (Basiouny *et al.* 1978, Evans *et al.* 2011; Barnes *et al.* 2013).

Les méthodes de détermination de la mortalité des tuniciers étaient également variables, mais les études sur le terrain classaient généralement les individus ou les colonies de tuniciers comme morts s'ils étaient absents, décolorés et en cours de putréfaction ou détachés du substrat (Carman *et al.* 2010; 2016). Dans certains cas, une réduction importante de la biomasse par rapport aux colonies témoins était un indicateur fiable de la régression de la colonie, menant finalement à la mortalité (voir Paetzold *et al.* 2012; Roche *et al.* 2015). Les études en laboratoire ont utilisé le manque de siphonnage de l'eau et l'absence de réaction tactique ou l'incapacité de fermer les valves après 48 heures dans les traitements de récupération (par exemple, Hillock et Costello 2013; Hopkins *et al.* 2016; Sievers *et al.* 2019).

La mortalité aux stades d'adulte (spores triactinomyxons nageant librement) et de juvénile (myxospores) du parasite responsable de la maladie du tournis a été évaluée à l'aide de coloration au bleu de méthylène, à l'iodure de propidium ou au diacétate de fluorescéine (par exemple, Hoffman et Markiw 1977; Wagner 2002; Wagner *et al.* 2003), où seul le matériel cellulaire mort prend la teinture. Dans une étude, la mortalité des myxospores était présumée en l'absence de production du stade triactinomyxon à partir des cultures de *Tubifex tubifex* inoculées de myxospores traitées sur une période de 4 à 5 mois (Hedrick *et al.* 2008).

3.2. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION PHYSIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES D'EAU DOUCE

L'efficacité de chacun des traitements de décontamination physiques courants pour les EAE d'eau douce est résumée ci-dessous et dans le tableau 3. Au total, nous avons examiné 49 sources documentaires (45 publications primaires et 4 rapports techniques) qui portaient sur la mortalité ou l'élimination associée à l'immersion dans de l'eau chaude (23), au lavage au jet d'eau chaude (11; 9 à basse pression et 2 à haute pression), au séchage à l'air (23) et à la congélation (8). Alors que la plupart des études étaient consacrées aux moules de la famille des dreissenidés (moules zébrées et quaggas), les effets mortels de l'immersion dans de l'eau chaude et du séchage à l'air couvraient un plus grand nombre d'EAE.

3.2.1. Immersion dans de l'eau chaude

L'exposition à de l'eau chaude est létale pour de nombreuses EAE d'eau douce, et la littérature scientifique décrit plusieurs combinaisons de température et d'exposition susceptibles de causer la mortalité. En général, l'immersion dans de l'eau chaude (43 à 49 °C) pendant de courtes périodes (1 à 15 minutes) était létale pour les moules de la famille des dreissenidés, plusieurs invertébrés pélagiques et quelques macrophytes. La tolérance thermique des moules de la famille des dreissenidés est la plus étudiée. Les températures létales de l'eau variaient entre 32 °C (plus de 4 jours, Elderkin et Klerks 2005) et 49 °C (1 minute, Beyer *et al.* 2011) pour la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), selon la durée d'immersion. De même, la limite thermique de la moule quagga (*Dreissena bugensis*) variait de 38 °C (20 minutes, Garton *et al.* 1990) à 49 °C (1 minute, Beyer *et al.* 2011).

L'immersion dans de l'eau chaude s'est révélée létale non seulement pour les moules de la famille des dreissenidés, mais aussi pour plusieurs autres EAE, y compris la nasse de Nouvelle-Zélande (par exemple, 1 minute à 45 °C, Dwyer *et al.* 2003), la petite corbeille d'Asie (*Corbicula fluminea*; par exemple, 5 minutes à 45 °C, Coughlan *et al.* 2019), le cladocère épineux (*Bythotrephes longimanus*; par exemple, 5 minutes à 43 °C, Beyer *et al.* 2011), la crevette rouge sang (*Hemimysis anomala*; par exemple, 15 minutes à 45 °C, Anderson *et al.*

2015) et certains macrophytes comme le myriophylle aquatique (*Myriophyllum aquaticum*), l'hydrocotyle fausse-renoncule (*Hydrocotyle ranunculoides*) et le grand lagarosiphon (*Lagarosiphon major*; par exemple, 15 minutes à 45 °C, Anderson *et al.* 2015). Des durées d'exposition variables ont été signalées pour la crevette tueuse (*Dikerogammarus villosus*; par exemple, 10 secondes à 40 °C, Shannon *et al.* 2018; 30 secondes à 50 °C, Sebire *et al.* 2018; 15 minutes à 45 °C, Anderson *et al.* 2015).

Bien que la littérature scientifique ait montré que l'immersion dans de l'eau chaude (45 °C) pendant 15 minutes était létale pour plusieurs invertébrés envahissants, des températures plus chaudes (5 minutes à 60 °C) ont été nécessaires pour tuer un plus grand nombre d'EAE, en particulier les macrophytes, car des températures plus basses étaient inefficaces. Par exemple, Blumer et ses collaborateurs (2009) ont testé six températures (entre 45 et 80 °C) et trois durées d'immersion (de 2 à 10 minutes) et ont indiqué qu'une immersion dans de l'eau à 60 °C pendant deux minutes était nécessaire pour provoquer la mortalité complète du myriophylle à épis (*Myriophyllum spicatum*). De même, Shannon et ses collaborateurs (2018) ont testé cinq températures (de 40 à 60 °C) et cinq durées (entre 10 secondes et 15 minutes) de traitement et signalé que seulement 40 % du myriophylle aquatique avait été tué à 45 °C (15 minutes), mais qu'ils avaient obtenu une mortalité de 100 % à des températures/durées d'exposition de 50 °C (cinq minutes) ou de 60 °C (10 secondes), ce qui contraste avec les résultats (45 °C, 15 minutes) présentés par Anderson et ses collaborateurs (2018). Les spores de *Myxobolus cerebralis*, le parasite des salmonidés responsable de la maladie du tournis chez le saumon et la truite d'élevage, ainsi que chez les poissons sauvages, n'étaient pas affectés par des températures de 40 °C, mais des températures de 60 °C pendant 10 minutes ont causé leur distorsion et leur mort probable (Hoffman et Putz 1969). D'autres études ont révélé que des températures d'au moins 75 °C pendant cinq minutes (Wagner *et al.* 2003) et de 90 °C pendant 10 minutes (Hoffman et Markiw 1977) étaient mortelles pour les spores.

Des études portant sur une combinaison de températures et de durées d'immersion ont révélé que la hausse des températures de l'eau réduisait le temps nécessaire pour la mortalité (Beyer *et al.* 2011; Anderson *et al.* 2015; Shannon *et al.* 2018). Par exemple, dans la plage de 40 à 100 °C, Mohit et ses collaborateurs (2021) ont montré que pour chaque augmentation de 1 °C de la température de l'eau, la durée d'exposition effective diminuait de 9,9 %.

3.2.2. Lavage sous pression

Le lavage sous pression peut éliminer ou tuer les EAE. Par exemple, un jet d'eau à haute pression peut éliminer les organismes incrustés ou leur causer des dommages physiques, et un jet à haute température peut provoquer un choc thermique et ainsi la mortalité des EAE. Les sections suivantes décrivent les effets du lavage sous pression sur l'élimination des EAE et la combinaison de la pression et de la température sur leur mortalité.

3.2.2.1. Élimination des espèces aquatiques envahissantes par lavage sous pression

Les études qui examinaient le lavage sous pression en comparant les jets à basse pression et à haute pression évaluaient principalement l'élimination des EAE plutôt que leur mortalité. Le lavage à haute pression s'est révélé plus efficace que le lavage à basse pression pour éliminer les EAE des embarcations (Rothlisberger *et al.* 2010; Wong *et al.* 2014). Rothlisberger et ses collaborateurs (2010) ont précisé, d'après des inspections visuelles, que l'enlèvement manuel et l'utilisation d'un jet à basse pression (40 lb/po²) pendant 90 à 180 secondes étaient beaucoup moins efficaces pour retirer les organismes de petite taille (par exemple, cladocère épineux) des embarcations, avec des taux d'élimination de 65 et de 74 %, respectivement, que l'utilisation d'un jet à haute pression (1 800 lb/po²) pendant 90 à 180 secondes, qui affichait un taux

d'élimination de 91 %. Ces auteurs ont également signalé que l'utilisation d'un jet à haute pression, l'inspection visuelle et l'enlèvement manuel produisaient des taux d'élimination des fragments de plantes beaucoup plus élevés (83 et 88 %, respectivement) que l'utilisation d'un jet à basse pression (62 %). Wong et ses collaborateurs (2014) ont examiné la pression (1 500 et 3 000 lb/po²) et la durée nécessaires pour retirer 100 % des moules zébrées et quaggas des embarcations et ont mentionné que le temps passé par une embarcation hors de l'eau, la quantité d'encrassement par les moules et la pression de l'eau utilisée étaient les principaux facteurs déterminant les taux d'élimination. Ils ont signalé que le temps requis pour retirer les moules des embarcations était beaucoup plus court lorsque la densité des moules était faible et la pression de l'eau élevée (3 000 lb/po² par rapport à 1 500 lb/po²), et que plus le bateau restait hors de l'eau (par exemple, une à deux semaines), plus vite les moules étaient enlevées parce que leurs byssus avaient probablement séché. Plus récemment, Mohit (2021) a testé les effets de six niveaux de pression variant entre 0 et 1 950 lb/po² et a montré que des pressions de 900 à 1 200 lb/po² enlevaient 90 % du périphyton des surfaces des carreaux d'aluminium en suspension (sur lesquels des algues et d'autres organismes avaient poussé pendant trois semaines). La pression la plus haute (1 950 lb/po²) s'est avérée moins efficace parce qu'elle entraînait plus d'éclaboussures, redistribuant les matières sur les surfaces, au lieu d'un écoulement de l'eau dans le cas des pressions plus basses.

En ce qui concerne les larves véligères de moule zébrée, Davis et ses collaborateurs (2016) ont constatés qu'un rinçage des viviers d'embarcations à l'aide d'un boyau d'arrosage (60 lb/po²) en retirait 90 %.

Une seule étude a démontré que c'était la pression (et non la température) qui induisait la mortalité, avec la fragmentation et la mortalité complète de l'hydrocotyle fausse-renoncule observées après l'utilisation de jets sous pression d'eau froide et d'eau chaude (1 600 lb/po²; Bradbeer *et al.* 2021).

3.2.2.2. Mortalité des espèces aquatiques envahissantes provoquée par l'utilisation d'un jet d'eau chaude

Il est important de noter que la température de l'eau qui sort d'un nettoyeur haute pression diminue avec la distance jusqu'au point de contact. Par exemple, Bradbeer et ses collaborateurs (2021) ont rapporté qu'un jet d'eau chaude sous pression d'un nettoyeur haute pression, programmé à 90 °C et projeté à une distance de 10 cm pendant 15 secondes, a donné une température maximale au contact de 67,4 °C et a diminué à 52,0 et 37,3 °C à des distances de 40 et 100 cm, respectivement. Sauf indication contraire, les températures présentées ci-après sont au point de contact et non la température programmée du nettoyeur haute pression.

Jet d'eau chaude à basse pression (inférieure à 60 lb/po²)

Trois études ont examiné les effets d'un jet d'eau chaude à basse pression sur la mortalité des moules de la famille des dreissenidés. Morse (2009) a évalué l'efficacité des jets d'eau chaude (quatre températures, entre 40 et 80 °C) à basse pression (15 lb/po²) pour tuer les moules zébrées en les aspergeant pendant 1, 5 ou 10 secondes. Il a conclu que les jets à 50 °C ou moins étaient inefficaces, mais que les jets à 60 °C pendant 10 secondes ou à 80 °C pendant 5 secondes étaient mortels à 100 %. Comeau et ses collaborateurs (2011) ont examiné la sensibilité de la moule quagga aux jets d'eau chaude à basse pression (2 lb/po²) à 6 températures (de 20 à 80 °C) et durées (de 1 à 160 secondes). L'augmentation de la température réduisait le temps pour provoquer la mortalité, les jets à 40 °C pendant 40 secondes, à 50 °C pendant 20 secondes, à 54 °C pendant 10 secondes et à 60 °C pendant 5 secondes entraînant une mortalité de 100 %. Wong et ses collaborateurs (2014), en plus d'évaluer les effets d'une haute pression sur les taux d'élimination, ont examiné le temps

nécessaire pour atteindre un taux de mortalité de 100 % chez les moules zébrée et quagga après une exposition à un jet d'eau chaude à basse pression (2 lb/po²; de 20 à 80 °C pendant 1 à 160 secondes). Ils ont indiqué que l'exposition à l'eau à 54 °C pendant 10 secondes serait efficace pour les moules zébrées et quaggas.

D'après Crane et ses collaborateurs (2019), l'exposition à la vapeur pendant au moins 10 secondes était létale pour plusieurs espèces de plantes aquatiques submergées, comme le potamot crépu (*Potamogeton crispus*). De même, Bradbeer et ses collaborateurs (2021) ont rapporté un taux de mortalité de 100 % des crevettes tueuses après une exposition directe à la vapeur pendant 10 secondes, mais qu'une durée d'exposition plus courte (5 secondes) n'entraînait que 70 % de mortalité. Des durées d'exposition plus longues, de 30 secondes, étaient nécessaires pour causer une mortalité de 100 % chez les moules de la famille des dreissénidés (Coughlan *et al.* 2020a), la crevette rouge sang (Coughlan *et al.* 2020b) et la petite corbeille d'Asie (Coughlan *et al.* 2019).

Jet d'eau chaude à haute pression (supérieure à 400 lb/po²)

À notre connaissance, une seule étude a évalué l'efficacité combinée des jets d'eau chaude et à haute pression sur la mortalité des EAE. Bien que des études antérieures indiquent que les jets d'eau chaude (à basse pression) à 54 °C pendant 10 secondes (Wong *et al.* 2014) ou à 60 °C pendant 10 secondes (Morse 2009) étaient létaux pour les moules zébrées, selon une étude récente de Bradbeer et ses collaborateurs (2021), seulement 50 et 83 % des moules zébrées étaient tuées à une température semblable (59 °C) après une exposition de 10 secondes et de 15 secondes à un jet d'eau chaude sous pression (1 600 lb/po²). Une température plus élevée, de 67,4 °C, était nécessaire pendant 15 secondes pour entraîner la mortalité de 100 % des moules zébrées, car une exposition de 10 secondes n'a provoqué qu'une mortalité de 92 %. Ces auteurs ont signalé qu'une température de 59 °C pendant 5 secondes était létale pour la crevette tueuse (mais seulement 83 % de mortalité à 55,9 °C pendant une exposition de 15 secondes), mais que la crassule de Helms (*Crassula helmsii*) survivait même après une exposition de 90 secondes à 67,4 °C. Aucune donnée n'a été trouvée pour d'autres EAE d'eau douce.

3.2.3. Séchage à l'air

Le séchage à l'air est l'une des méthodes les plus étudiées dans la littérature pour le contrôle des EAE d'eau douce, avec un total de 23 publications (2 rapports techniques et 21 publications primaires) couvrant toutes les EAE d'eau douce ciblées ici. Cependant, aucune donnée n'était disponible pour de nombreux stades de juvéniles, y compris la petite corbeille d'Asie, la nasse de Nouvelle-Zélande ou la crevette tueuse. Les températures de séchage à l'air variaient de 5 à 40 °C et leur létalité pour les EAE dépendait d'un certain nombre de facteurs, notamment la température, l'humidité relative, le stade biologique et la durée d'exposition à l'air.

Dans le cas des moules de la famille des dreissénidés, la durée létale de séchage à l'air variait généralement de 1 à 7 jours dans des conditions de température chaude (au moins 20 °C) et de 5 à 47 jours dans des conditions plus froides (moins de 20 °C; Ricciardi *et al.* 1995; Ussery et McMahon 1995; Kappel 2012, Collas *et al.* 2014; Mohit 2021). Les durées de séchage à l'air requises pour causer la mortalité de 100 % des moules de la famille des dreissénidés diminuaient avec l'augmentation des températures, mais dépendaient de la taille des moules et de l'humidité relative (par exemple, McMahon *et al.* 1993; Ricciardi *et al.* 1995). Ricciardi et ses collaborateurs (1995) ont signalé qu'à 20 °C et 50 % d'humidité relative (conditions tempérées au début de l'été), les grandes moules zébrées (21 à 28 mm) mouraient après 7 jours d'exposition à l'air, contrairement à des conditions humides plus froides (10 °C, 95 % d'humidité relative; conditions printanières/automnales), dans lesquelles 15 jours étaient nécessaires. Ces

auteurs ont également noté que les moules plus petites (10 à 18 mm) mouraient plus rapidement (5 jours) à 20 °C et 50 % d'humidité relative que les plus grandes. Plusieurs études ont montré que les invertébrés plus gros ou plus âgés résistent mieux au séchage que les individus plus petits ou les juvéniles (Ricciardi *et al.* 1995; Richards *et al.* 2004; Collas *et al.* 2014; Snider *et al.* 2014). Une humidité relative plus élevée améliorerait aussi la tolérance des EAE au séchage à l'air (par exemple, McMahon *et al.* 1993; Ricciardi *et al.* 1995). Par exemple, Ricciardi et ses collaborateurs (1995) ont constaté que pour une même température (20 °C) et une même durée de séchage à l'air (5 jours), la mortalité des moules zébrées diminuait avec l'augmentation de l'humidité relative : une mortalité de 100 % à une humidité relative faible (10 %) diminuait à 84 et 53 % avec une humidité relative plus élevée, à 50 et 95 % respectivement.

Le séchage à l'air à 20 ou 21 °C (humidité relative de 68 %) était efficace à 99 % pour tuer la nasse de Nouvelle-Zélande en moins de 2 jours (44 ou 45 heures; Richards *et al.* 2004; Collas *et al.* 2014) tandis que des températures plus élevées tuaient la nasse beaucoup plus rapidement (29 °C pendant 21 heures et 40 °C pendant 2 heures; Richards *et al.* 2004). Les résultats pour la petite corbeille d'Asie n'étaient pas uniformes, une étude signalant un taux de mortalité de 99 % à 20 °C après 23 jours (humidité relative de 68 %; Collas *et al.* 2014), tandis qu'une autre a montré une mortalité similaire (90 %) après 3,5 jours à la même température, mais avec une humidité relative plus élevée (80 %; Guareschi et Wood 2020). Cette dernière étude a présenté une mortalité de 100 % à des températures plus élevées (25 à 30 °C) après 48 heures (humidité relative de 80 %).

Comparativement, il y avait moins d'information sur l'efficacité du séchage pour lutter contre les invertébrés pélagiques et le parasite *M. cerebralis*. Il faut respectivement 1 et 9 jours de séchage à 14 °C (Anderson *et al.* 2015) pour atteindre un taux de mortalité de 90 % chez la crevette rouge sang et la crevette tueuse, tandis que des températures de séchage supérieures peuvent tuer plus rapidement, avec une mortalité de 100 % chez la crevette rouge sang après 2 ou 3 heures à 20 °C (De Stasio *et al.* 2019). Les cladocères (*Cercopagidae* spp.) sont également sensibles, avec une mortalité de 100 % pour les œufs après 6 heures à 17 °C (Branstrator *et al.* 2013) et de 99 % pour les adultes après 3 heures à 20 °C (Mohit 2021). Des durées de séchage plus courtes (1 heure, 20 °C) étaient nécessaires pour atteindre une mortalité de 100 % chez le parasite *M. cerebralis* adulte (Wagner 2002; Wagner *et al.* 2003). Selon Hedrick et ses collaborateurs (2008), il fallait 18,5 heures de séchage à 22 °C pour les stades de juvéniles.

Bien que la littérature scientifique propose de nombreuses études sur les effets du séchage à l'air sur les espèces de macrophytes, on observe une variation importante de l'efficacité (de 0 à 100 %) entre les espèces; ces variations étaient liées à la température, à l'humidité relative, au type de tissu végétal (par exemple, tige, turion), à la forme des fragments (par exemple, tige unique, spiralée) et à la durée d'exposition à l'air. Le séchage s'est révélé létal à des températures d'au moins 20 °C (humidité relative de 40 %) pendant plus de 3 heures pour le myriophylle à épis (fragments non spiralés, Jerde *et al.* 2012; Barnes *et al.* 2013; Bruckerhoff *et al.* 2015), le cabomba de Caroline (*Cabomba caroliniana*; Barnes *et al.* 2013; Bickel 2015), l'hydrille verticillée (*Hydrilla verticillata*; Baniszewski *et al.* 2016) et le potamot crépu (Barnes *et al.* 2013; Bruckerhoff *et al.* 2015), mais pas pour le myriophylle aquatique (Barnes *et al.* 2013). Anderson et ses collaborateurs ont cependant signalé un taux de mortalité de 90 % du myriophylle aquatique à 14 °C après un séchage pendant 9 jours. Dans les études où les températures étaient plus basses (et l'humidité relative plus élevée), des durées de séchage plus longues étaient nécessaires pour provoquer la mortalité des macrophytes (Evans *et al.* 2011; Bickel 2015; Bruckerhoff *et al.* 2015). Le type de tissu était important, les turions s'avérant plus résistants au séchage que les tiges simples du potamot crépu (Bruckerhoff *et al.* 2015). Il

en va de même pour la morphologie, les tiges uniques mourant plus rapidement lorsqu'elles étaient exposées au séchage que les masses enroulées des tiges du myriophylle à épis (Jerde *et al.* 2012; Bruckerhoff *et al.* 2015) et du potamot crépu (Bruckerhoff *et al.* 2015).

3.2.4. Congélation

Il y avait très peu d'information disponible sur l'efficacité de la congélation pour la mortalité des EAE, sauf pour la moule zébrée, la nasse de Nouvelle-Zélande, *Cercopagidae* spp. et *M. cerebralis*. Dans l'ensemble, la littérature primaire a montré que les températures efficaces pour provoquer une mortalité de 100 % varient entre -1,5 et -20 °C. La mortalité des moules zébrées individuelles est de 100 % après 0,5 heure à -10 °C, mais il faut 2 heures pour parvenir à ce résultat pour les amas de moules (McMahon *et al.* 1993; Payne *et al.* 1992). La mortalité de la nasse de Nouvelle-Zélande est de 98 % après 4 jours de congélation à des températures comprises entre -8 et -14 °C (Cheng et LeClair 2011). Aucun cladocère n'a survécu après avoir été aspergé d'eau et congelé pendant 2 heures (De Stasio *et al.* 2019). Branstrator et ses collaborateurs (2013) ont noté que la congélation des œufs de cladocère pendant 24 heures était efficace dans l'eau, mais pas dans l'air. Les résultats pour la mortalité de *M. cerebralis* étaient plus complexes, certaines études montrant une mortalité de 100 % chez les adultes après congélation dans l'eau pendant 100 minutes à -20 °C (Wagner 2002; Wagner *et al.* 2003), mais d'autres indiquant des durées variables (de 7 jours à 9 mois) pour les juvéniles (Hoffman et Putz 1969; Hedrick *et al.* 2008).

3.3. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION CHIMIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES D'EAU DOUCE

L'efficacité de chacun des traitements de décontamination chimiques communs pour les EAE d'eau douce est résumée ci-dessous et dans le tableau 4. Au total, nous avons examiné 49 sources documentaires (42 publications primaires et 3 rapports techniques) qui portaient sur la mortalité associée à l'hypochlorite de sodium (28; dont 11 qui utilisaient d'autres oxydants chlorés), à l'acide acétique (2), aux composés d'ammonium quaternaire (10), à l'eau salée (11) et au Virkon (12). Les études étaient consacrées principalement aux moules de la famille des dreissenidés, à la nasse de Nouvelle-Zélande et à la petite corbeille d'Asie, mais peu s'intéressaient à la mortalité chez les invertébrés pélagiques, et une seule concernait les macrophytes.

3.3.1. Hypochlorite de sodium (eau de Javel, hypochlorite de sodium à 5 %)

La majorité des études évaluant l'utilisation de l'hypochlorite de sodium (ou d'autres oxydants chlorés) pour tuer 100 % des moules zébrées adultes étaient axées sur une faible dose (0,000025 à 0,0015 %), une exposition chronique à long terme (4 à 45 jours) dans le contexte de la décontamination des prises d'eau industrielles et des systèmes de chloration continue (Greenshields et Ridley 1957; Klerks et Fraleigh 1991; Martin *et al.* 1993a, 1993b; McMahon *et al.* 1994; Matisoff *et al.* 1996; Harrington *et al.* 1997; Rajagopal *et al.* 2002, 2003). Les larves véligères de moule zébrée sont mortes plus rapidement, avec une mortalité de 100 % après 18 à 24 heures à des concentrations d'exposition semblables (Van Benschoten *et al.* 1993; McMahon *et al.* 1994). La faible dose (0,000005 à 0,0001 %) et l'exposition chronique à long terme (6 à 36 jours) ont également été efficaces pour tuer les adultes de petites corbeilles d'Asie dans certaines études (Bernhard 1986; Cherry *et al.* 1986; Ramsay *et al.* 1988), mais pas dans d'autres (0,000025 à 0,001 %; 28 jours; Doherty *et al.* 1986). Les concentrations plus élevées (0,001 à 1,0 %) pendant des périodes d'exposition plus courtes (30 minutes à 2 jours) n'étaient pas non plus létales pour la petite corbeille d'Asie (Tilly 1976; Mattice *et al.* 1982; Barbour *et al.* 2013; Coughlan *et al.* 2019). L'immersion dans des concentrations de 0,00005 %

pendant 96 à 108 heures était létale à 100 % pour les larves de petites corbeilles d'Asie (Goss *et al.* 1979), mais des concentrations semblables n'ont pas permis de tuer de façon fiable des myes juvéniles (Doherty *et al.* 1986). Toutefois, pour les deux espèces, l'efficacité du traitement dépendait de la durée d'exposition, de la concentration de chlore et de la température de l'eau.

L'immersion dans 0,04 à 0,05 % d'hypochlorite de sodium ou un jet d'hypochlorite de sodium entre 0,04 et 0,05 % pendant 20 minutes a tué 100 % de tous les stades de la crevette rouge sang et des cladocères (De Stasio *et al.* 2019), mais les crevettes tueuses étaient plus résistantes; il a fallu les immerger dans de l'hypochlorite de sodium à 5 % pendant au moins 30 secondes pour tuer les adultes et dans une solution à 0,02 % pendant 15 minutes pour tuer les juvéniles (Sebire *et al.* 2018). En ce qui concerne le parasite *M. cerebralis* responsable de la maladie du tournis chez les poissons, des concentrations supérieures à 0,25 % sont efficaces contre les stades des myxospores après une exposition de 10 à 15 minutes (Hoffman et Putz 1969; Wagner 2002; Hedrick *et al.* 2008), alors que des immersions dans des solutions entre 0,0013 et 0,013 % pendant 1 à 10 minutes sont efficaces contre les stades des triactinomyxons (Wagner *et al.* 2002, 2003).

Aucun traitement à l'hypochlorite de sodium n'était efficace pour tuer quelque stade que ce soit de la nasse de Nouvelle-Zélande (Dwyer *et al.* 2003; Hosea et Finlayson 2005; De Stasio *et al.* 2019) ou du myriophylle à épis (Watkins et Hammerschlag 1984), et aucune donnée n'était disponible pour les autres espèces de macrophytes.

3.3.2. Acide acétique (vinaigre, acide acétique à 5 %)

Seules deux publications primaires ont examiné l'efficacité de l'acide acétique pour tuer les EAE d'eau douce. Les immersions dans des concentrations de 2,5, 3,75 et 5 % (vinaigre) ont tué 100 % des moules zébrées adultes en 4 heures, 2 heures et 1 heure, respectivement (Davis *et al.* 2015a), mais les immersions dans de l'acide acétique à 5 % (vinaigre) ont pris plus de 10 minutes pour tuer 100 % des larves véligères de moule zébrée (Davis 2016). Aucune information n'est disponible dans la littérature sur l'efficacité de l'acide acétique en tant que traitement de décontamination pour les moules quaggas, la nasse de Nouvelle-Zélande, la petite corbeille d'Asie, les cladocères, la crevette rouge sang, la crevette tueuse, le parasite responsable de la maladie du tournis ou les espèces de macrophytes.

3.3.3. Composés d'ammonium quaternaire

Les composés d'ammonium quaternaire (CAQ) étudiés dans la littérature pour la lutte contre les EAE d'eau douce étaient le BULAB 6002, le BULAB 6009, le polyquaternium WSCP, le chlorure de didécylidiméthylammonium (CDDA), le HDQ, le Formula 409, le Roccal-D, le Sparquat, le Hyamine 1622, le chlorure de benzalkonium et le Stepanquat. Étant donné que différents produits contiennent différentes concentrations de CAQ, les résultats sont présentés ici (et dans le tableau 4) en pourcentage de CAQ (et non en pourcentage du produit) pour faciliter la comparaison. La plupart des recherches sur l'utilisation de CAQ pour la décontamination portent sur leur efficacité sur la nasse de Nouvelle-Zélande, mais il n'y a pas de consensus général sur les traitements efficaces pour cette espèce. Deux études ont montré que des concentrations de 0,07 à 0,15 % pendant une exposition de 5 minutes étaient létales à 100 % pour la nasse de Nouvelle-Zélande adulte (Hosea et Finlayson 2005; Stout *et al.* 2016), mais Schisler et ses collaborateurs (2008) ont trouvé ce même traitement totalement inefficace. Trois autres études montrent que des concentrations plus élevées, de 0,24 à 0,4 % ou plus pendant plus de 5 minutes étaient également létales (Schisler *et al.* 2008; Opligner et Wagner 2011; De Stasio *et al.* 2019).

Comme pour les traitements de décontamination à l'hypochlorite de sodium, la plupart des études sur les applications de CAQ pour lutter contre la moule zébrée étaient des expositions à faible dose par immersion chronique à long terme, avec une létalité de 100 % entre 0,00003 et 0,0001 % pendant une durée de 2 à 34 jours et entre 0,00005 et 0,0004 % pendant une durée de 22 à 29 jours pour les adultes et les larves véligères, respectivement (Martin *et al.* 1993a, 1993b; McMahon *et al.* 1994). Une seule étude sur les larves véligères de moules quaggas a montré une efficacité de 100 % après une immersion de 10 minutes dans une solution à 0,4 % de CAQ (Britton et Dingman 2011).

Des concentrations de 0,15 % de CAQ sont également létales à 100 % pour les stades myxospores du parasite responsable de la maladie du tournis (*M. cerebralis*) après 10 minutes d'immersion (Hedrick *et al.* 2008), bien que des concentrations plus faibles (de 0,02 à 0,08 %) pendant 24 heures aient également été jugées efficaces (Hoffman et Putz 1969; Wagner 2002). Comme les CAQ interfèrent avec les fonctions de la membrane des branchies (Schisler *et al.* 2008), ils ne sont pas efficaces pour lutter contre les macrophytes envahissants et aucune information n'était disponible pour les autres EAE ciblées.

3.3.4. Eau salée (chlorure de sodium et chlorure de potassium)

Les durées d'exposition par immersion pour atteindre une mortalité de 100 % chez les moules zébrées adultes sont de 5 à 31 jours dans l'eau salée à des concentrations de 0,1 à 0,2 ppm de chlorure de potassium (KCl; Lewis *et al.* 1997; Fernald et Watson 2014; Moffit *et al.* 2016), mais seulement d'un minimum de 12 heures pour les concentrations de 10 à 30 ppm de KCl (Davis *et al.* 2018). Des concentrations semblables de chlorure de sodium (NaCl) étaient plus lentes pour atteindre une létalité de 100 % (30 à 50 ppm pour des durées de 24 heures à 18 jours; Spidle *et al.* 1994; Davis *et al.* 2015b, 2018). Les immersions aiguës plus courtes (5 heures) à des salinités élevées (30 ppm) de mélange de KCl et de NaCl ne sont pas efficaces pour les moules adultes (Ellis et Maclsaac 2009). La mortalité des larves véligères de moule zébrée était de 100 % après 5 à 24 heures à des concentrations de KCl de 0,96 à 10 ppm (Waller *et al.* 1996; Moffit *et al.* 2016; Davis *et al.* 2018), mais des concentrations légèrement plus élevées de NaCl (10 à 20 ppm) étaient nécessaires pour provoquer la même mortalité sur des durées semblables d'exposition par immersion (Waller *et al.* 1996; Davis *et al.* 2018). Un mélange de solutions salines (KCl + NaCl) entre 14 et 30 ppm était également efficace pour tuer les larves de moule zébrée en aussi peu que 2 heures (Ellis et Maclsaac 2009).

Les moules quaggas adultes étaient plus difficiles à tuer : il fallait jusqu'à 40 heures d'immersion à des concentrations plus élevées (33 ppm) d'eau salée (eau de mer naturelle) et 70 heures à des concentrations plus faibles (15 à 21,3 ppm de dilution d'eau de mer naturelle; Hofius *et al.* 2015) pour atteindre une mortalité de 100 %. Les durées plus courtes (5 heures) à 30 ppm (Instant Ocean^{MD}, un mélange de KCl + NaCl) sont également complètement inefficaces (Ellis et Maclsaac 2009). Selon Spidle et ses collègues (1995), jusqu'à 18 jours sont nécessaires pour tuer efficacement les moules quaggas adultes par immersion dans des solutions de NaCl à 50 ppm, et aucune donnée n'était disponible pour leurs larves véligères.

L'immersion en eau salée est inefficace pour la petite corbeille d'Asie (Barbour *et al.* 2013; Coughlan *et al.* 2019), mais létale pour la puce d'eau en hameçon (*Cercopagis pengoi*) et le cladocère épineux (24 à 30 ppm, immersion entre 1 et 4 heures), de même que pour la crevette rouge sang (30 ppm, de 3 à 5 heures; Ellis et Maclsaac 2009). Aucune donnée n'était disponible pour les autres EAE ciblées.

3.3.5. Virkon^{MD}

Le Virkon^{MD} est un germicide à large spectre utilisé pour le nettoyage et la désinfection dans la pratique vétérinaire et ailleurs (ingrédient actif : bis(peroxymonosulfate) bis(sulfate) de pentapotassium, voir la [Bibliothèque de fiches signalétiques](#) pour consulter la fiche signalétique du produit et la liste des ingrédients). Quatre-vingt-dix minutes d'immersion dans 2 à 4 % de Virkon^{MD} ont permis d'atteindre une mortalité de 100 % chez la moule zébrée adulte (Coughlan *et al.* 2020b), et les immersions dans 0,5 à 2 % étaient létales pour les larves véligères après 2 minutes (Davis 2016). Les larves adultes et véligères de moule quagga étaient plus faciles à tuer, avec une même efficacité après 5 à 10 minutes à la même concentration (Stockton 2011; Moffit *et al.* 2015). Des concentrations inférieures (0,25 à 0,5 %) de Virkon^{MD} peuvent également être efficaces pour tuer les larves adultes et véligères de moule quagga si on augmente les durées d'immersion à entre 10 et 15 minutes (Stockton 2011).

Des applications par immersion et jet de 2 % de Virkon^{MD} pendant 20 minutes sont létales à 100 % pour les stades adultes et juvéniles de la nasse de Nouvelle-Zélande (Stockton 2011; Stockton et Moffitt 2013; De Stasio *et al.* 2019), ainsi que pour les stades adultes et juvéniles des puces d'eau et de la crevette rouge sang (De Stasio *et al.* 2019). La durée d'exposition nécessaire est moins longue pour la crevette tueuse, avec une mortalité de 100 % après une immersion de 60 secondes ou un jet de 2 minutes à la même concentration (Bradbeer *et al.* 2020). Les immersions dans 1 % de Virkon^{MD} sont également efficaces pour la crevette rouge sang (1 minute; Coughlan *et al.* 2020a) et la crevette tueuse (12 minutes : Sebire *et al.* 2018; 2 minutes : Bradbeer *et al.* 2020).

Des résultats contradictoires ont été observés pour la petite corbeille d'Asie : une immersion dans 2 % de Virkon^{MD} aurait entraîné une mortalité de plus de 93 % après une exposition de 5 minutes (Barbour *et al.* 2013), mais une deuxième étude a rapporté une grande capacité de survie même après 80 minutes d'immersion dans 2 à 4 % de Virkon^{MD} (Coughlan *et al.* 2019). Les immersions pendant 30 minutes dans 2 à 4 % de Virkon^{MD} n'ont pas tué l'élodée dense (Crane *et al.* 2020) et aucune donnée n'était disponible pour les autres macrophytes ou le parasite *M. cerebralis*.

3.4. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION PHYSIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES

Dans la littérature sur la gestion des EAE marines, la décontamination peut être classée dans l'application de l'immersion en eau douce, de l'immersion en eau chaude, du lavage sous pression et du séchage à l'air. Au total, nous avons examiné 40 sources documentaires (25 publications primaires et 15 rapports techniques) qui portaient sur divers traitements physiques, notamment le lavage à l'eau de mer sous pression (9), le séchage à l'air (13), l'utilisation d'eau douce (17), l'immersion dans de l'eau de mer chaude ou de l'eau douce (11) ou une combinaison de ceux-ci, pour lutter contre les EAE marines (tableau 5). Un aperçu de ces traitements physiques et de la littérature pertinente à leur sujet est présenté ci-après. Quelques résultats non publiés fournis par des experts locaux ont également été pris en considération pour certains traitements et sont identifiés comme des « données non publiées » dans les tableaux.

3.4.1. Immersion dans de l'eau douce ou lavage au jet d'eau douce

Les durées d'immersion en eau douce requises pour provoquer une mortalité de 100 % variaient d'une espèce à l'autre et allaient de 3 heures à plus de 24 heures. D'après les résultats qualitatifs donnés dans Carman *et al.* (2010), un jet d'eau douce pendant seulement 5 minutes, appliqué directement à des huîtres ou à l'équipement d'aquaculture, est efficace

pour éliminer les tuniciers solitaires et coloniaux. Une autre étude a révélé une mortalité de près de 100 % des tuniciers coloniaux (botryloïde violet [*Botrylloides violaceus*] et botrylle étoilé [*Botryllus schlosseri*]) après des immersions en eau douce d'au moins 6 heures (à l'échelle laboratoire) à 24 heures (à l'échelle terrain), respectivement (Ramsay 2015a). MacNair et ses collaborateurs (2006) ont également démontré une mortalité de 100 % des tuniciers lorsque les colonies de *B. violaceus* étaient conservées pendant de longues périodes (de 18 à 24 heures) en eau douce et des expériences en aquarium ont révélé qu'une immersion de 4 heures en eau douce était efficace à 100 % pour tuer le didemnum (*Didemnum vexillum*; McCann et al. 2013). Dans une étude sur la réaction physiologique de *B. schlosseri* et de *B. violaceus* à de faibles salinités, Dijkstra et ses collaborateurs (2008) ont démontré la sensibilité de ces espèces à l'eau douce, avec une mortalité de 100 % de toutes les colonies des deux espèces après une immersion à une concentration de 5 ppm pendant 24 heures. Carman et ses collaborateurs (2016) ont montré qu'une immersion en eau douce (8 heures) et l'utilisation d'un jet d'eau douce (10 minutes) suivies d'un séchage à l'air d'une heure étaient efficaces contre les tuniciers coloniaux (*B. schlosseri*, *B. violaceus*, *D. vexillum* et les tuniciers voile *Diplosoma listerianum*) présents sur les boudins utilisés en aquaculture. Denny (2008) a signalé que la mortalité de *D. vexillum* augmentait avec des durées d'immersion plus longues en eau douce (suivies d'une période d'exposition de 24 heures à l'air), mais sans atteindre une efficacité de 100 % : mortalité de 74 % pour une immersion de 2 minutes, de 84 % pour 5 minutes et de 87 % pour 10 minutes. Selon Ramsay (2015b), une immersion d'au moins 3 heures en eau douce (expérience à petite échelle) est suffisante pour causer une mortalité de 100 % chez l'ascidie jaune (*Ciona intestinalis*) adulte. Les stades larvaires et juvéniles n'ont pas été pris en compte dans cette étude, mais les auteurs ont supposé que les premiers stades biologiques de l'ascidie seraient plus vulnérables à l'immersion en eau douce. Cependant, des essais supplémentaires ont été menés par le même laboratoire en 2020 et les résultats préliminaires suggèrent que des immersions de 3 et 6 heures n'étaient pas efficaces à 100 % pour tuer les individus *C. intestinalis* présents sur des boudins de moules, tandis que les essais sur 12 et 24 heures ont donné des résultats prometteurs pour une mortalité de 100 % (Ramsay, données non publiées). D'après les résultats des essais sur les effets de la réduction de la salinité sur les œufs et les larves de *C. intestinalis* pendant différentes durées d'exposition, presque aucune métamorphose ou larve en mouvement n'a été observée avec une durée d'immersion d'une heure en eau douce (Bourque et al., MPO, données non publiées). Cependant, une immersion d'une minute était inefficace (mortalité de 10 %) pour éliminer *C. intestinalis* de l'équipement de culture (Carver et al. 2003). Alors qu'une immersion en eau douce pendant 3 heures était suffisante pour causer une mortalité de 100 % chez l'ascidie plissée juvénile et adulte (*Styela clava*; Ramsay 2015c), une autre étude a indiqué que la mortalité de *S. clava* survenait dans les 24 heures (Coutts et Forrest 2005). Rolheiser et ses collaborateurs (2012) ont signalé que l'eau douce n'était pas efficace pour éliminer *D. vexillum* à des durées d'exposition plus courtes (0,5, 1, 5 et 10 minutes) et ont en fait montré une augmentation de l'encrassement par *D. vexillum* dans le temps. Les résultats pour les moules étaient semblables, les immersions en eau douce pendant 24 heures (adultes) et de 24 à 48 heures (juvéniles) étant jugées inefficaces pour tuer la moule bleue (*Mytilus edulis*; Forrest et Blakemore 2006; Carman et al. 2016; Landry et al. MPO, données non publiées).

Aucune information n'était disponible pour le crabe vert. Des périodes prolongées d'apport d'eau douce n'étaient pas efficaces contre le crabe sanguin (*Hemigrapsus sanguineus*), avec un taux de survie de 65 % après une immersion de 2 semaines à 1 ppm (Hudson et al. 2018).

Les thalles de l'algue verte *Codium fragile* ont survécu pendant au moins 6 heures en eau douce et ont récupéré presque complètement leur capacité photosynthétique en quelques heures après avoir été replacées dans l'eau de mer (Kim et Garbary 2007). D'autres données montrent qu'une immersion en eau douce de plus de 24 heures est nécessaire pour tuer

C. fragile (Landry *et al.*, MPO, données non publiées). Une immersion d'un jour (à 20 °C) ou de deux jours (à 10 °C) dans l'eau douce tue la fougère de mer *Undaria pinnatifida* (tous les stades : gamétophyte et plantule; Forrest et Blakemore 2006).

3.4.2. Immersion dans de l'eau de mer chaude ou de l'eau douce

Carver et ses collaborateurs (2003) ont montré qu'une immersion d'une minute dans de l'eau douce à 40 °C était partiellement efficace (66 %) pour éliminer *C. intestinalis* dans des conditions de laboratoire et efficace à 100 % pendant des essais sur l'équipement de culture et un stock d'huîtres. Gill et ses collaborateurs (2007) ont pour leur part constaté qu'une immersion de quelques secondes dans l'eau de mer à 60 °C n'était pas efficace pour la même espèce. Une autre étude a révélé que l'immersion dans de l'eau de mer à 40 °C pendant 10 ou 30 secondes entraînait un taux de mortalité de 66 %, mais que des expositions de 60 secondes à 40 °C et de 10, 30 ou 60 secondes à 50 °C et à 60 °C dans de l'eau de mer causait une mortalité de 100 % chez l'ascidie (Sievers *et al.* 2019). Dans la même étude, une faible mortalité (environ 12 %) a été enregistrée pour *S. clava* pour tous les traitements dans de l'eau de mer à 40 °C. La mortalité augmentait avec la température, 50 °C causant une mortalité de 40, 70 et 86 % après 10, 30 et 60 secondes, respectivement. De même, une température de 60 °C entraînait une mortalité de 86, 100 et 100 % après 10, 30 et 60 secondes, respectivement (Sievers *et al.* 2019). Cependant, Davidson et ses collaborateurs (2005) ont constaté qu'une immersion de quatre secondes à une température entre 80 et 90 °C était nécessaire pour causer une mortalité de 100 % chez *S. clava*.

Best et ses collaborateurs (2014) ont trouvé qu'une immersion à 55 °C pendant une minute n'était pas efficace pour tuer les moules adultes (*M. edulis*). Gonzalez et Yevich (1976) ont montré qu'après une période d'acclimatation (élévation de la température d'environ 1 °C/jour de 2,5 à 25 °C), les moules adultes (*M. edulis*) exposées à de l'eau de mer chauffée ne présentaient aucune mortalité à 26 °C pendant 24 heures, alors qu'une immersion à 28 °C entraînait une mortalité de 100, 80 et 50 % après 6, 4 et 3 jours, respectivement, et qu'une immersion à 27 °C pendant 48 heures provoquait seulement une mortalité de 6 %. De plus, les mêmes auteurs ont remarqué que toute la population de moules présente dans le canal d'effluents mourait lorsque les températures se situaient entre 28 et 30 °C pendant 3 jours (travaux sur le terrain). Forrest et Blakemore (2006) ont montré qu'un traitement par immersion dans l'eau de mer pendant seulement 5 secondes à température élevée (55 °C) était inefficace sur les stades juvéniles de la moule *M. edulis*, et une autre étude en laboratoire a révélé qu'une température de 30 °C pendant 10 minutes était inefficace pour tuer les moules juvéniles (Landry *et al.*, MPO, données non publiées). Cependant, Rajagopal et ses collaborateurs (2005) ont démontré qu'une température de 36 °C pendant 84 minutes et de 41 °C pendant une minute entraînait une mortalité de 100 % chez les moules juvéniles. Toutefois, Landry et ses collaborateurs (MPO, données non publiées) ont mesuré un taux de mortalité de 87 % chez les moules juvéniles à une température similaire (40 °C) pendant 5 minutes, et une immersion à 32,6 °C (6 heures) provoquait un taux de mortalité de 76 % chez le naissain de moule (Leblanc *et al.* 2005).

L'immersion de crabes verts juvéniles dans de l'eau de mer à des températures de 45 à 55 °C pendant une minute ou à 55 °C pendant 5 secondes à une minute a causé leur mortalité (100 %), mais des immersions dans de l'eau de mer à 40 °C pendant une minute ou entre 45 et 50 °C pendant 5 secondes étaient inefficaces ou seulement partiellement efficaces (Best *et al.* 2014).

Un traitement à l'eau de mer chauffée (50 °C) pendant 30 secondes est efficace pour tuer *C. fragile* (Landry *et al.*, MPO, données non publiées). Comparativement, un traitement par immersion dans de l'eau de mer chaude entre 80 et 85 °C pendant 3 secondes s'est révélé

efficace pour tuer les propagules de macroalgues introduites par la culture et le transport des huîtres, ce qui s'est traduit par une réduction considérable de la biodiversité des algues (dans certains cas, aucune) ou par la seule présence de petites algues vertes tubulaires *Ulva* spp. (Mineur *et al.* 2007). Les durées d'exposition à l'eau chaude qui ont entraîné la mortalité complète d'*U. pinnatifida* étaient de 10 minutes (35 °C), 45 secondes (45 °C) et 5 secondes (55 °C) [Forrest et Blakemore 2006].

3.4.3. Lavage sous pression (jets à basse et haute pression)

3.4.3.1. Jet d'eau chaude à basse pression (inférieure à 60 lb/po²)

Davidson et ses collaborateurs (2005) ont constaté qu'un traitement à la vapeur (50 lb/po²; 100 °C) pendant 30 secondes produisait une mortalité de 100 % pour *S. clava*. Joyce et ses collaborateurs (2019) ont examiné l'efficacité de l'exposition directe à la vapeur (100 °C; 50 lb/po²) pour provoquer la mortalité de certaines espèces de biosalissures (moule bleue *Mytilus edulis*, huître du Pacifique *Magallana gigas* (anciennement *Crassostrea gigas*), balane *Semibalanus balanoides*, fucus vésiculeux *Fucus vesiculosus* et *Ulva* sp). Ils ont observé une mortalité totale de *M. edulis* (adulte) et de *Magallana gigas* (juvéniles) à 60 secondes, de *Semibalanus balanoides* à 30 secondes et de *Magallana gigas* à 300 secondes. L'application de vapeur a également réduit la biomasse de *F. vesiculosus* et a considérablement réduit celle de *Ulva* sp., avec une dégradation complète observée pour *Ulva* sp. après 120 secondes d'exposition.

3.4.3.2. Jet d'eau chaude à haute pression (supérieure à 400 lb/po²)

Comparativement, les études sur *U. pinnatifida* montrent que les jets d'eau à haute pression sont tout à fait efficaces pour éliminer les gamétophytes d'*Undaria* des coquilles à une pression d'au moins 2 000 lb/po² pendant 2 secondes (Forrest et Blakemore 2006). Coutts (2006) et Coutts et Forrest (2007) signalent qu'une combinaison de jet d'eau à haute pression et de séchage à l'air est une méthode rentable pour traiter les amarres et diverses autres structures artificielles. Le retrait et le traitement à terre sur les amarres par jet à 2 000 lb/po² et séchage à l'air pendant 48 heures peuvent éliminer à la fois *D. vexillum* et d'autres espèces non ciblées. Cependant, une autre étude a révélé que l'utilisation de jets à haute pression (2 000 à 3 000 lb/po² pendant 10 à 30 secondes) n'était pas efficace à 100 % pour éliminer les salissures, y compris les tuniciers non indigènes et les organismes mobiles, sur les huîtres du Pacifique d'élevage (Curtis *et al.* 2021). Paetzold et ses collaborateurs (2012) et Arens et ses collaborateurs (2011) ont montré que le traitement par jet d'eau à haute pression (700 lb/po²) était efficace pour réduire *B. schlosseri* et *B. violaceus* et d'autres organismes épifauniques, mais que les jets d'eau à basse pression (40 lb/po²) n'avaient aucun effet (Arens *et al.* 2011). De plus, Ramsay (2014) a constaté que l'utilisation d'eau à haute pression avec des buses rotatives (400 à 600 lb/po²) était également efficace pour réduire *C. intestinalis* sur des boudins de moules.

3.4.4. Séchage à l'air

Les tuniciers vivants (y compris *B. schlosseri*, *B. violaceus*, *D. vexillum*, *D. listerianum*, *C. intestinalis* et *S. clava*) étaient absents des mollusques et des engins d'aquaculture après des traitements par exposition à l'air pendant 24 heures et 3 jours, respectivement, simulant le transport terrestre (Carman *et al.* 2010). MacNair et ses collaborateurs (2006) ont montré que des bouées séchées à l'air pendant 72 heures étaient presque exemptes (moins de 100 %) de botrylloïdes violets vivants (*B. violaceus*), à l'exception de quelques très petits morceaux entre des algues fixées à l'extrémité supérieure de la bouée. Il a fallu laisser hors de l'eau les pontons infestés de *D. vexillum* pendant environ deux semaines pour dessécher les colonies (Pannell et

Coutts 2007). Un essai d'exposition à l'air pendant seulement 6 heures (18 à 19 °C; humidité relative de 92 %) a entraîné une mortalité de 100 % des colonies de *B. schlosseri* sur des plaques de contrôle en PVC (Bernier *et al.*, MPO, données non publiées). Hopkins et ses collaborateurs (2016) ont démontré que le séchage à l'air peut être une méthode d'atténuation efficace pour une vaste gamme de taxons de salissures, notamment l'ascidie transparente du Pacifique *Ciona savignyi*, où les adultes sont morts en 24 heures d'exposition à l'air tandis que la mortalité de 100 % des recrues a eu lieu après seulement 8 heures. Il n'y a pas de consensus dans la littérature sur l'efficacité du séchage à l'air pour *S. clava* (voir Hillock et Costello 2013). Ces auteurs ont montré que le séchage à l'air sous la lumière directe du soleil est le plus efficace, indépendamment de l'humidité relative, et qu'il faut moins de temps pour atteindre une mortalité de 100 %. La lumière directe du soleil entre 25 et 27 °C a causé la mortalité de *S. clava* dans les 24 heures. La mortalité diminuait avec la température et les auteurs ont prédit que l'exposition à l'air pendant deux semaines pourrait être une méthode de gestion efficace pour éradiquer *S. clava* de l'équipement lorsque la température de l'air est de 10 °C. Dans le cas des structures et des navires infestés par l'ascidie plissée envahissante, il faut les retirer de l'eau pour les faire sécher à l'air pendant au moins une semaine (Coutts et Forrest 2005). Une semaine d'exposition à l'air est nécessaire parce que *S. clava* peut survivre à une exposition à l'air de 17 heures à 6 jours environ, selon les températures ambiantes et l'humidité, particulièrement dans des conditions d'humidité élevée, comme lorsqu'elle pousse sur une corde.

Seuront et ses collaborateurs (2019) ont constaté qu'une exposition à l'air de 6 heures à 41 °C était efficace pour tuer 100 % des moules *M. edulis* adultes, mais n'ont observé aucune mortalité lorsque les bivalves étaient exposés à des températures entre 20 et 41 °C pendant 3 heures. Leblanc et ses collaborateurs (2005) ont révélé qu'une exposition de 11 heures à l'air (27 °C) entraînait une mortalité de 47,8 % chez les moules *M. edulis* juvéniles. Hopkins et ses collaborateurs (2016) ont testé l'effet du séchage à l'air sur les stades juvéniles et adultes de la moule méditerranéenne *Mytilus galloprovincialis* et constaté qu'une exposition de 7 jours à l'air extérieur était requise, à une température moyenne de 20,3 °C, pour être létale à 100 % pour les moules adultes. Par ailleurs, des expositions à l'air pendant 24 et 6 heures (18,5 °C; humidité relative de 95 %) ont causé une mortalité de 100 % et 80 %, respectivement, chez les moules *M. galloprovincialis* juvéniles.

Le crabe vert peut survivre pendant de longues périodes hors de l'eau, en particulier dans des espaces protégés ou fermés, où l'humidité relative demeure suffisamment élevée pour éviter le séchage des branchies (Darbyson *et al.* 2009). À des températures moyennes de 29 °C, 50 % des crabes entièrement exposés à l'air ont survécu de 59 à 105 heures. Aucun crabe n'a survécu jusqu'à la fin de l'expérience (7 jours) dans le traitement visant uniquement le crabe avec des densités plus élevées (10 ou 15 individus), et 7 % ont survécu dans les caisses où la densité des crabes était plus faible (5 individus). Cependant, environ 60 % des crabes ont survécu jusqu'à 7 jours lorsque les caisses à poisson où ils étaient conservés contenaient de l'eau de mer ou de l'eau de mer et des cordages.

Il existe peu d'information sur les effets du séchage à l'air sur la survie de *C. fragile*, mais l'espèce semble tolérante à la dessiccation (MacNair 2002; Kim et Garbary 2007). Après 5 heures de séchage à l'air, les thalles de *C. fragile* avaient perdu 20 % de leur masse, mais affichaient encore des niveaux élevés d'activité photosynthétique (Kim et Garbary 2007), et la mortalité des plantes laissées sécher à l'air libre pendant 24 heures était inférieure à 100 % (MacNair 2002). Comparativement, une mortalité complète des gamétophytes et des plantules de l'algue *U. pinnatifida* est possible après 3 jours (10 °C) et 1 jour (20 °C) de séchage à l'air, respectivement, à l'humidité ambiante (humidité relative de 55 à 85 %) et 6 semaines (20 °C) à une humidité élevée (humidité relative supérieure à 95 %) [Forrest et Blakemore 2006].

Cependant, dans le traitement à 10 °C et humidité élevée, des gamétophytes vivants étaient encore présents après 8 semaines de séchage à l'air (Forrest et Blakemore 2006).

3.5. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION CHIMIQUES POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES

Nous avons examiné divers traitements chimiques à partir de 28 sources documentaires (19 publications primaires et 9 rapports techniques) qui portaient sur la lutte contre les EAE marines, notamment l'immersion et/ou jet (suivi ou non d'une exposition à l'air) d'hypochlorite de sodium (11), d'acide acétique (17), de solutions de saumure (12) et de chaux hydratée (12). Un aperçu de ces traitements est présenté dans les tableaux 6 et 7 et fourni ci-après. Quelques résultats non publiés fournis par des experts locaux ont été pris en considération pour certains traitements et sont identifiés comme des « données non publiées » dans les tableaux.

3.5.1. Hypochlorite de sodium (eau de Javel, hypochlorite de sodium à 5 %)

Une immersion de 20 minutes dans de l'hypochlorite de sodium à 0,006 % n'a pas permis d'éliminer *C. intestinalis* de l'équipement de culture ostéricole (Carver *et al.* 2003), mais selon une étude pilote (observations qualitatives), les jets de solutions plus concentrées (hypochlorite de sodium à 1 %) pendant 5 secondes pourraient être efficaces pour *C. intestinalis* et le botrylle commun de Leach *Botrylloides leachii* lorsque les tuniciers traités sont ensuite laissés pendant une période d'exposition de 30 minutes avant d'être rincés à l'eau de mer (Piola *et al.* 2009). Dans la même étude, bien que des jets de solutions moins concentrées (hypochlorite de sodium à 0,5 %) suivis d'une exposition à l'air de 6 heures aient été efficaces pour *B. schlosseri*, la même concentration était inefficace pour *B. leachii* et *C. intestinalis*, même après une période d'exposition à l'air de 12 heures (Piola *et al.* 2009). L'immersion dans une solution d'hypochlorite de sodium à 0,3 ou 0,6 % a entraîné une mortalité de 100 % de *B. violaceus* en seulement 15 secondes (MacNair *et al.* 2006), alors que l'immersion dans des concentrations plus diluées d'hypochlorite de sodium (0,01, 0,02 ou 0,05 %) a pris beaucoup plus de temps (au moins 12 heures) pour provoquer une mortalité de 100 % de *S. clava* (Coutts et Forrest 2005). Les expériences en aquarium menées par McCann et ses collaborateurs (2013) ont montré une mortalité de 100 % de *D. vexillum* après immersion dans une concentration d'hypochlorite de sodium à 0,05 % pendant 10 minutes, mais les essais de Roche et ses collaborateurs (2015) menés en laboratoire pendant 5, 15 et 30 minutes à une concentration plus élevée (1 %) n'ont provoqué qu'une mortalité de 50, 65 et 55 %, respectivement. Chez les naissains de moules encrassés par *D. vexillum*, l'immersion dans une solution d'hypochlorite de sodium à 0,25 % (pendant 2 minutes) ou à 0,5 % (pendant au moins 20 secondes) a éradiqué 100 % des tuniciers envahissants (Denny 2008).

Rajagopal et ses collaborateurs (2002, 2003) ont constaté que les immersions dans de très faibles concentrations d'hypochlorite de sodium étaient efficaces à 100 % pour les moules *M. edulis* adultes dans les systèmes de chloration continue, mais qu'elles nécessitaient des durées d'exposition très longues (40 jours à 0,0001 % et 62 jours à 0,000025 %). Cependant, à une concentration plus élevée (0,0004 %), une durée d'immersion plus courte (150 heures) était suffisante pour tuer les moules adultes (Haque *et al.* 2015). De même, Haque et Kwon (2017) ont montré que la durée requise pour atteindre une mortalité de 100 % des moules adultes de deux groupes de taille (14 et 25 mm) dans l'hypochlorite de sodium à 0,0004 % était de 124 heures (14 mm) et de 150 heures (25 mm), respectivement. Les larves véligères de moules étaient plus faciles à tuer, les immersions dans l'hypochlorite de sodium à 0,0001 % (20 minutes), 0,00001 % (4 heures) et 0,000005 % (5 heures) causant une mortalité de 100 % (Haque *et al.* 2014). Cependant, une exposition plus longue (7 heures) était nécessaire pour les

moules juvéniles (1,4 mm), même à des concentrations plus élevées d'hypochlorite de sodium (0,0004 %) [Haque *et al.* 2015].

3.5.2. Acide acétique (vinaigre, acide acétique à 5 %)

L'immersion dans des concentrations d'acide acétique à 4 % pendant une minute a entraîné la mortalité complète des tuniciers coloniaux *B. schlosseri* et *B. leachii*, tandis que l'immersion dans des concentrations plus faibles (2 %) n'était pas efficace (Forrest *et al.* 2007). De même, l'immersion dans de l'acide acétique à 5 % a causé une mortalité de 100 % de *B. violaceus* en seulement 15 secondes (MacNair *et al.* 2006). Une immersion de 2 minutes dans de l'acide acétique à 10 % a également provoqué une mortalité de 100 % chez un autre tunicier colonial, *D. vexillum* (McCann *et al.* 2013), alors que d'après des études en laboratoire de Roche et ses collaborateurs (2015), une immersion de 5 minutes à la moitié de cette concentration peut entraîner une mortalité de 65 %. Chez les naissains de moules encrassées par *D. vexillum*, l'immersion dans une solution à 4 % d'acide acétique pendant 10 minutes s'est traduite par la mortalité d'environ 95 % des tuniciers, mais des concentrations plus faibles (1 à 2 %) et leurs durées d'exposition respectives (1 à 10 minutes) étaient moins efficaces (environ 45 à 82 %) dans plusieurs essais sur le terrain (Denny 2008). De plus, Rolheiser et ses collaborateurs (2012) ont montré que l'immersion dans de l'acide acétique à 5 % pendant seulement 30 secondes était efficace pour provoquer la mortalité de *D. vexillum*.

Les jets d'acide acétique étaient moins efficaces ou moins pratiques pour contrôler les salissures sur les boudins de moules. MacNair et ses collaborateurs (2006) indiquent que deux passages (30 secondes) d'un jet d'acide acétique à 5 % appliqué à l'aide d'un vaporisateur commercial avec plusieurs buses sont efficaces à 90 % pour *B. violaceus* et ont éliminé la plupart des autres organismes encrassants, mais qu'un jet de d'acide acétique à 4 % (3 secondes), suivi d'une exposition d'une heure à l'air, n'a donné qu'un taux de mortalité de 81 % chez *D. vexillum* (Denny 2008). Dans d'autres cas, un jet d'acide acétique à 5 % (5 secondes) sur des plaques encrassées par des tuniciers, suivi d'une exposition de 30 minutes à l'air, a été efficace contre *B. schlosseri*, *B. leachii* et *C. intestinalis* (Piola *et al.* 2009). D'après des essais à grande échelle avec l'acide acétique, le même document a également montré qu'un traitement par un seul jet d'une solution de 5 % d'acide acétique causait une mortalité de 100 % chez *D. vexillum* lorsque les colonies étaient exposées à l'air pendant 30 minutes après le jet.

L'ascidie jaune semblait plus sensible à l'acide acétique que les tuniciers coloniaux, des concentrations de 5 % d'acide acétique s'avérant très efficaces pour tuer *C. intestinalis*, avec des durées d'immersion aussi courtes que 10 secondes (Sievers *et al.* 2019), 15 secondes (Gill *et al.* 2007), 1 minute (Carver *et al.* 2003) et 4 minutes (Forrest *et al.* 2007) démontrant un taux de mortalité de 100 %. De plus, des immersions dans de l'acide acétique à 5 % pendant 30 secondes (Carver *et al.* 2003) et de 5 à 10 secondes (Locke *et al.* 2009) étaient efficaces respectivement à 95 % et entre 70 et 95 % contre *C. intestinalis*. Dans des concentrations plus faibles d'acide acétique (2 %), il a fallu 60 secondes pour entraîner une mortalité de 100 % chez *C. intestinalis*, bien que l'ajout d'un traitement thermique (40 °C) combiné à une immersion à la même concentration ramène la durée d'immersion requise à 10 secondes (Sievers *et al.* 2019). Dans d'autres cas, les immersions dans de l'acide acétique à 2 % et des jets d'acide acétique (5 %) étaient considérablement moins efficaces ou inefficaces (Gill *et al.* 2007; Forrest *et al.* 2007; Sievers *et al.* 2019).

Une combinaison d'immersion et d'exposition à l'air était extrêmement efficace pour éliminer les tuniciers, avec une période de séchage de 24 heures (dans des armoires à température contrôlée pour simuler le transport interrégional) après une minute d'immersion dans des solutions d'acide acétique à 2 ou 4 %, entraînant une mortalité de 100 % chez *C. intestinalis*,

B. schlosseri et *B. leachii* (Forrest *et al.* 2007). Cependant, comme l'exposition à l'air est limitée à une heure, une immersion plus longue (5 minutes) dans de l'acide acétique à 5 % est nécessaire pour atteindre une mortalité de 100 % chez plusieurs espèces de tuniciers, notamment *B. schlosseri*, *B. violaceus*, *D. vexillum*, *D. diplosoma*, *C. intestinalis* et l'ascidie sale (*Ascidiella aspersa*) [Carman *et al.* 2016].

La réaction de *Styela clava* à l'acide acétique était plus variable : le traitement le plus doux ayant permis d'atteindre une mortalité de 100 % était une immersion dans une solution d'acide acétique à 2 % à 40 °C pendant 60 secondes (Sievers *et al.* 2019) ou dans une solution d'acide acétique à 5 % pendant 15 secondes (Davidson *et al.* 2005). Pour leur part, Coutts et Forrest (2005) indiquent qu'une immersion d'une minute dans une faible concentration (2 %) n'était pas efficace pour tuer *S. clava*. De plus, ils montrent qu'une concentration de 5 % peut tuer 100 % de *S. clava* après une minute, mais qu'il faut une immersion d'au moins 10 et 5 minutes dans des solutions à 1 % et 2 %, respectivement (Coutts et Forrest 2005). En outre, les immersions dans l'acide acétique (à 2 et 5 %) pendant 60 secondes n'étaient efficaces qu'à 50 % (Sievers *et al.* 2019), alors qu'un jet d'acide acétique à 5 % n'était efficace qu'entre 5 et 60 % contre *S. clava* (Davidson *et al.* 2005) lorsque les boudins de moules ont été immédiatement remis à l'eau après le traitement.

Plusieurs études ont démontré que les traitements de courte durée par immersion ou par jet avec de l'acide acétique à 5 % (de 5 à 30 secondes) étaient inefficaces sur la moule bleue (*M. Edulis*) [Carver *et al.* 2003; MacNair *et al.* 2006; Gill *et al.* 2007; Locke *et al.* 2009]. Une seule étude a mesuré une mortalité de 100 % chez les jeunes moules lorsque les organismes étaient immergés dans de l'acide acétique à 5 % pendant 5 minutes (Carman *et al.* 2016).

Il existe très peu d'information sur les effets de l'immersion dans l'acide acétique ou du jet d'acide acétique sur la mortalité des macroalgues envahissantes. Une expérience exhaustive a porté sur les effets du jet d'acide acétique à 5 % sur 11 espèces d'algues, dont *U. pinnatifida*, les algues vertes du genre *Ulva* et les algues rouges, et a démontré qu'un jet suivi d'une exposition de 10 minutes à l'air a entraîné la mort presque complète (moins de 100 %) de toutes les espèces d'algues, à l'exception d'*Ulva linze* (Piola *et al.* 2009). Forrest et ses collaborateurs (2007) ont présenté des résultats très variables pour la mortalité du phytoravageur *U. pinnatifida* (tous les stades) en réaction à l'immersion dans de l'acide acétique; dans l'ensemble, toutefois, une solution à 4 % était efficace à 100 % pour la majorité des tissus (gamétophytes, plantules et sporophylles) après une minute. De plus, les résultats d'essais sur le terrain ont montré qu'une immersion dans une solution d'acide acétique à 5 % pendant 15 secondes était très efficace pour tuer une espèce de *Cladophora*, un type de macroalgue verte filamenteuse (MacNair 2009), tandis que Sharp et ses collaborateurs (2006) ont constaté que le même traitement n'était pas efficace (12 à 79 %) contre la même macroalgue.

3.5.3. Solutions de saumure

Carman et ses collaborateurs (2010) ont étudié la mortalité des tuniciers fixés sur des huîtres provoquée par une immersion dans une solution de saumure (70 ppm) et ont montré que des immersions de 10 minutes suivies d'un séchage à l'air pendant 2 heures étaient efficaces contre plusieurs espèces de tuniciers (*B. schlosseri*, *B. violaceus*, *Didemnum albidum* [un tunicier de la famille des Didemnidés], *D. vexillum*, *Diplosoma listerianum*, *Molgula manhattensis* [molgule de Manhattan], *S. clava*, *A. aspersa*). Cependant, une étude plus récente a indiqué qu'une immersion de seulement 10 secondes (70 ppm), suivie d'un séchage à l'air d'une heure, était suffisante pour tuer certaines de ces mêmes espèces (*B. schlosseri*, *B. violaceus*, *D. vexillum*, *D. listerianum*, *C. intestinalis*, *A. aspersa*; Carman *et al.* 2016). À des concentrations de saumure comparables (62 ppm), McCann et ses collaborateurs (2013) ont conclu que des

durées d'immersion de plus de 4 heures étaient nécessaires pour une efficacité à 100 % contre *D. vexillum*. Par ailleurs, Rolheiser et ses collaborateurs (2012) ont montré que des concentrations de 40, 50 et 70 ppm de saumure (avec une exposition de 0,5 à 10 minutes) n'avaient pas d'effet sur *D. vexillum*, l'encrassement ayant augmenté cinq semaines après le traitement après la remise à l'eau. De même, des expériences menées avec des solutions de saumure (300 ppm) ont révélé qu'à elle seule, une immersion de 15 secondes sans exposition à l'air (MacNair *et al.* 2006), n'était pas efficace contre *B. violaceus*, et qu'une immersion de 30 secondes (Gill *et al.* 2007) et de 8 minutes (Carver *et al.* 2003) était également inefficace pour tuer *C. intestinalis*. MacNair et ses collaborateurs (2006) ont également réalisé plusieurs essais sur des engins d'aquaculture et des boudins de moules encrassés par des tuniciers pour tester des immersions dans une solution de saumure (300 ppm), suivies d'une période d'exposition à l'air. À ces concentrations saturées, la saumure était efficace pour réduire l'encrassement par le botrylloïde violet, avec une immersion de 5 minutes suivie d'une heure de séchage à l'air semblant efficace à 100 %, mais une immersion d'une minute suivie de la même période de séchage à l'air n'était pas assez longue pour assurer une mortalité totale. De même, une immersion de 15 secondes (300 ppm) suivie d'une période de séchage d'une heure n'était pas efficace pour tuer *C. intestinalis* (Gill *et al.* 2007).

Les traitements par immersion dans une solution de saumure (300 et 70 ppm; avec et sans période de séchage à l'air) étaient complètement inefficaces (0 %) sur les moules adultes et juvéniles ou ont entraîné un taux de mortalité très faible (MacNair *et al.* 2006; Sharp *et al.* 2006; Bourque et Myrand 2007; Carman *et al.* 2016; Landry *et al.* MPO, données non publiées). Le traitement le plus efficace (mortalité de 39 % chez les premiers stades biologiques des moules) était une immersion dans une solution à 300 ppm (10 minutes), suivie de 24 heures de séchage à l'air (MacNair *et al.* 2006).

Une immersion dans une solution de saumure (300 ppm) pendant 15 minutes suivie d'une heure de séchage à l'air est un traitement prometteur pour tuer *C. fragile* selon Landry et ses collaborateurs (MPO, données non publiées), ce qui est confirmé par des résultats semblables (mortalité de 100 % après une immersion de 15 minutes dans une solution à 300 ppm) obtenus dans une étude de MacNair (2002). Des données supplémentaires ont montré que les immersions pendant 15 ou 10 minutes, combinées au séchage à l'air pendant 2 ou 24 heures, respectivement, étaient également des combinaisons efficaces à 100 % (MacNair 2002). Pour d'autres espèces de macroalgues, l'immersion dans une solution de saumure à 400 ppm pendant 30 minutes a considérablement réduit leur survie, à l'exception de quelques taxons résistants (par exemple, *Cladophora* spp., espèces tubulaires d'*Ulva*) [Mineur *et al.* 2007]. En comparaison, une immersion de 15 secondes dans une solution de saumure à 300 ppm s'est révélée efficace pour tuer *Cladophora* sp. (MacNair 2009), mais Sharp et ses collaborateurs (2006) ont déterminé que ce traitement n'était pas totalement efficace (de 69 à 96 %) contre cette macroalgue.

3.5.4. Chaux hydratée

L'immersion dans des solutions (de 4 à 20 %) de chaux hydratée (hydroxyde de calcium) pour lutter contre les tuniciers et les algues sur les engins d'aquaculture a donné des résultats mitigés. Ramsay et ses collaborateurs (2014) ont constaté qu'une immersion de 2 minutes dans une solution à 4 % était moyennement efficace (80 %) pour les tuniciers *C. intestinalis* et *S. clava*. Des résultats semblables ont été observés pour *C. intestinalis* sur les appareils de culture et les huîtres (Carver *et al.* 2003), ainsi que sur les collecteurs (Gill *et al.* 2007), les immersions dans des solutions à 4 % pendant 8 minutes et 15 secondes causant respectivement une mortalité de 70 % et de 50 à 80 %.

L'encrassement par *D. vexillum* était réduit de 80 à 96 % après une immersion de 2 à 4 minutes dans une solution de chaux entre 4 et 5 % (Denny 2008; Switzer *et al.* 2011). Denny (2008) a également démontré qu'une solution de chaux à 10 % était efficace à 99 % sur *D. vexillum* avec des durées d'exposition semblables. Des expériences sur le terrain et en laboratoire menées par Rolheiser et ses collaborateurs (2012) ont confirmé ces résultats et démontré que l'exposition à une solution à 4 % de chaux hydratée pendant 5 minutes était la plus efficace (92 %) pour éliminer *D. vexillum*. MacNair et ses collaborateurs (2006) ont testé des immersions dans des solutions à 4 % de chaux sur des boudins de moules pendant des périodes plus courtes, de 15 secondes, pour contrôler *B. violaceus*, mais tous les tuniciers se sont complètement rétablis après avoir été remis à l'eau 7 jours après le traitement.

L'exposition à l'air après l'immersion dans la chaux peut parfois assurer une mortalité plus élevée et est couramment utilisée pour tuer les tuniciers sur les engins encrassés afin d'obtenir des résultats systématiquement efficaces (Ramsay *et al.* 2014; MacNair *et al.* 2006). Les bouées exposées à l'air pendant 10 et 15 minutes après une immersion de 15 secondes dans une solution de chaux ont révélé une mortalité de 80 et 90 % de *B. violaceus*, 7 jours après le traitement, respectivement (MacNair *et al.* 2006). De plus, une immersion dans une solution à 4 % de chaux hydratée pendant 15 secondes, suivie d'une exposition de 20 minutes à l'air, a entraîné une mortalité de 100 % des ascidies jaunes encrassant des bouées (Gill *et al.* 2007). Selon des évaluations visuelles qualitatives, les jets de chaux hydratée (à 20 % pendant 5 secondes) étaient également efficaces sur *B. schlosseri* et *B. leachii* lorsque des plaques souillées traitées étaient laissées pendant 6 heures (exposition à l'air), mais le même traitement exigeait des expositions plus longues (12 heures) pour *C. intestinalis* (Piola *et al.* 2009). Les jets combinés à une exposition à l'air (45 secondes) appliqués sur les tuniciers fixés sur des boudins de moules se sont révélés efficaces sur *S. clava* (Ramsay *et al.* 2014).

Les traitements par immersion (jusqu'à une minute) dans de la chaux hydratée (4 %) et l'utilisation d'un jet (15 secondes) se sont avérés inefficaces sur les moules bleues adultes (MacNair *et al.* 2006; Gill *et al.* 2007; Locke *et al.* 2009; Comeau *et al.* 2017). De même, des immersions de 2 minutes (Ramsay *et al.* 2014) et de 30 secondes dans une solution de chaux à 4 %, suivies d'une heure de séchage à l'air (Landry *et al.*, MPO, données non publiées), n'ont pas eu d'effet sur la survie des moules juvéniles, bien que des périodes d'exposition plus longues (15 et 30 minutes) aient eu tendance à augmenter la mortalité (53 à 78 %) [Landry *et al.*, MPO, données non publiées].

L'immersion dans de la chaux hydratée (4 % pendant 2 minutes) n'était pas létale pour le crabe vert (Ramsay *et al.* 2014), mais une immersion dans une solution à 4 % (5 minutes) était efficace à plus de 90 % pour tuer *C. fragile* (MacNair 2002). Une courte immersion (30 secondes) dans de la chaux hydratée à 4 %, combinée à une heure de séchage à l'air, était également un moyen efficace de tuer *C. fragile* selon Landry et ses collaborateurs (MPO, données non publiées). De plus, MacNair (2002) a également observé un taux de mortalité proche de 100 % chez *C. fragile* après des immersions de 15 minutes et d'une minute, suivies de 2 et 24 heures de séchage à l'air, respectivement.

3.6. PROTOCOLES LVS+D UTILISÉS AU CANADA ET AILLEURS

Au total, nous avons retenu 15 publications sur l'eau douce pour cet examen, ainsi que plusieurs communications personnelles avec des experts de diverses provinces canadiennes. La plupart des protocoles pour l'eau douce utilisés par les provinces et les États ont été élaborés pour l'inspection et la décontamination des embarcations et ciblent les moules de la famille des dreissenidés par l'utilisation d'un jet d'eau chaude sous pression. L'utilisation de produits chimiques était principalement associée à la décontamination de certaines espèces (par exemple, contre le parasite responsable de la maladie du tournis, *M. cerebralis*) et à la

décontamination de petits équipements. Nous avons trouvé très peu de protocoles pour le milieu marin et ils comprenaient habituellement une combinaison de traitements physiques et chimiques, mais ils avaient surtout été élaborés pour différentes applications (par exemple, activités liées à l'aquaculture) et les détails sur les traitements (concentrations et durées d'exposition) n'étaient souvent pas précisés. Un résumé des protocoles de décontamination les plus couramment utilisés en eau douce est présenté dans le tableau 8.

3.6.1. Protocoles de décontamination pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce

3.6.1.1. Lignes directrices « Lavez, Videz, Séchez » (LVS) destinées au grand public

La plupart des provinces canadiennes appuient les programmes LVS, qui encouragent le grand public et les propriétaires de bateaux à réduire le transfert d'espèces envahissantes en lavant, vidant et séchant leurs embarcations et équipement lorsqu'ils les déplacent d'un plan d'eau à l'autre (MRNFO 2017; MFFP 2018; CEENB 2019; Government of Saskatchewan 2020; NSISC 2020; Government of Alberta 2021; CCEE 2021; Government of British Columbia 2021a; Government of Manitoba 2021a; PEIISC 2021; Government of Yukon 2021). Cependant, des conditions particulières (par exemple, températures et pressions des jets, séchage à l'air et durées d'exposition au traitement) n'étaient pas précisées dans la plupart des lignes directrices, lesquelles avaient été surtout élaborées pour les embarcations de plaisance utilisées en eau douce. Très peu de renseignements ont été trouvés sur les protocoles LVS pour les Territoires du Nord-Ouest (Government of Northwest Territories 2021), le Nunavut (Government of Nunavut 2021) et Terre-Neuve-et-Labrador (Government of Newfoundland and Labrador 2021).

3.6.1.2. Protocoles de décontamination appliqués aux stations d'inspection des embarcations

Toutes les embarcations doivent s'arrêter pour une inspection lorsque les stations sont ouvertes en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan et au Manitoba. Au besoin, les embarcations et l'équipement sont décontaminés par du personnel formé; les traitements comprennent l'utilisation d'eau chaude sous pression ou de produits chimiques pour tuer les EAE sans endommager les embarcations et l'équipement.

Les provinces de l'Ouest (Alberta, Colombie-Britannique, Manitoba et Saskatchewan) ont axé leurs protocoles sur les recommandations formulées dans le document « Uniform Minimum Protocols and Standards for watercraft inspection and decontamination programs for dreissenid mussels in the western United States » (UMPS IV; Elwell et Phillips 2021), qui ont été élaborées par la *Pacific States Marine Fisheries Commission*. Ce document a été adopté par le [Western Regional Panel on Aquatic Nuisance Species](#) et est appliqué par la plupart des programmes d'inspection et de décontamination des embarcations dans l'ouest des États-Unis. Le document UMPS IV recommande d'utiliser des températures létales de l'eau (voir ci-après) comme méthode de décontamination privilégiée pour les moules de la famille des dreissenidés. Le lavage ou le rinçage à haute pression permettent d'éliminer les moules, et les températures létales de l'eau tuent les larves véligères et les adultes. Bien qu'il ait été mis au point pour les moules de la famille des dreissenidés, ce protocole est également appliqué pour d'autres types de décontamination (par exemple, décontamination de l'eau stagnante, des plantes et des appâts).

Le document UMPS IV recommande de recourir au lavage à l'eau chaude sous pression pour décontaminer les embarcations et d'ajuster la pression (faible ou 3 000 lb/po²), la température (49 ou 60 °C) et la durée (10, 130 ou 132 secondes) en fonction des compatibilités du type d'équipement et de la surface (surfaces extérieures, système de propulsion, zones intérieures,

équipement et remorque). Par exemple, il est recommandé d'utiliser de l'eau chaude (60 °C) à haute pression (3 000 lb/po²) pendant 10 secondes pour la coque, mais un jet ou un rinçage à plus basse pression à 60 °C pendant au moins 2 minutes pour le système de propulsion (cardan et moteur) afin d'éviter d'endommager l'embarcation. Un jet à basse pression et à température plus basse (49 °C) et une durée de contact plus longue sont recommandés pour les zones intérieures plus sensibles comme les citernes de ballast, les viviers pour appâts vivants et les fonds de cale. Les protocoles insistent sur le fait qu'il faut surveiller la température de l'eau au point de contact pour s'assurer d'appliquer la bonne température pendant le processus de décontamination afin de tenir compte des pertes de température de l'eau avec la distance. Plusieurs manuels détaillés décrivent étape par étape les protocoles et les procédures de décontamination; voir par exemple Brown et Walters (2021), ainsi que ceux des gouvernements de l'Alberta (2020) et de la Colombie-Britannique (2020a). Le groupe *Aquatic Nuisance Species Task Force* (ANSTF 2013), ainsi que plusieurs États américains (par exemple, Utah Department of Natural Resources 2012; Michigan Department of Environmental Quality 2014; Washington Department of Fish and Wildlife 2016; Minnesota Department of Natural Resources 2017; Wisconsin Department of Natural Resources 2020; Brown et Walters 2021) et le Québec (MFFP 2018) ont élaboré des protocoles semblables, mais avec certaines variations (par exemple, différentes pressions ou durées d'exposition).

Les protocoles de décontamination utilisés aux stations d'inspection des embarcations de la Colombie-Britannique suivent directement les lignes directrices du document UMPS IV. Le manuel de formation sur l'inspection et la décontamination des embarcations de 2020 de la Colombie-Britannique (Government of British-Columbia 2020b) décrit des méthodes détaillées étape par étape pour l'inspection et la décontamination des embarcations, des diagrammes d'évaluation des risques et de l'information sur la législation et la mise en application. Les inspecteurs des EAE sont équipés d'une unité mobile de décontamination (nettoyeur à haute pression à l'eau chaude) pour permettre la décontamination aux stations d'inspection routières ou lors des inspections planifiées par les équipes d'inspection itinérantes.

De même, le gouvernement de l'Alberta a adopté un protocole UMPS IV modifié, mettant en œuvre un protocole de décontamination pour les travaux dans l'eau ou à proximité (Government of Alberta 2020). Deux protocoles de décontamination principaux sont appliqués : une décontamination partielle (aussi appelée décontamination de l'eau stagnante ou des plantes ou lavage à chaud) et une décontamination complète (utilisée uniquement sur les embarcations encrassées par des moules) [Mcleod, R., comm. pers.]. On procède à une décontamination partielle lorsqu'il y a de l'eau stagnante ou de l'eau non vérifiable (comme l'eau des citernes de ballast) sur une embarcation à haut risque, conformément aux recommandations du protocole UMPS IV. Lorsqu'on trouve des moules envahissantes à bord d'une embarcation, un professionnel formé et certifié en inspection et décontamination des embarcations réalise une décontamination complète. De plus, des désinfectants chimiques peuvent être nécessaires pour les EAE qui sont difficiles à contrôler. Par exemple, on utilise de l'eau chaude à haute pression pour le parasite responsable de la maladie du tournis, mais combinée à une immersion dans un CAQ ou à un jet de CAQ, et à des températures beaucoup plus élevées (traitement à la vapeur à 90 °C par rapport à 60 °C habituellement appliqué pour les moules de la famille des dreissenidés) [Mcleod, R., comm. pers.]. Les traitements de décontamination ciblant le parasite responsable de la maladie du tournis dépendent des zones à risque pour cette maladie (blanc, jaune et rouge) et des niveaux de décontamination requis.

Les inspecteurs d'embarcations en Saskatchewan suivent également les lignes directrices UMPS IV pour décontaminer les bateaux à leurs stations d'inspection et de décontamination, ou chaque fois qu'une embarcation leur est envoyée par des agents de conservation ou par l'Agence des services frontaliers du Canada aux fins de suivi (Geiger, J., comm. pers.).

Le *Règlement sur les espèces aquatiques envahissantes* du Manitoba, pris en vertu de la *Loi sur la protection des eaux* (Government of Manitoba 2021b), exige la décontamination lorsqu'il n'est pas possible de sécher entièrement l'équipement avant de le placer dans un autre plan d'eau et/ou si une embarcation ou équipement est retiré d'une zone de contrôle (zone où une EAE est déjà présente ou une zone où on s'attend qu'elle se propager en raison de la connectivité vers l'aval). En vertu de ce règlement, la décontamination des embarcations et de l'équipement peut être effectuée à une station d'inspection des embarcations gérée par le gouvernement du Manitoba ou les utilisateurs peuvent également procéder eux-mêmes à la décontamination (LeGal, M., comm. pers.). Le traitement de décontamination des embarcations effectué par le gouvernement du Manitoba comprend un jet d'eau chaude (50 ou 60 °C) à basse pression (40 à 60 lb/po²) appliqué pendant des durées variables (10, 70 ou 130 secondes) à proximité (10 cm au maximum) de la surface, les combinaisons de température, de pression et de durée étant ajustées en fonction du type d'embarcation ou des composants à décontaminer (par exemple, viviers, citernes de ballast et moteurs) afin d'éviter d'endommager l'équipement. En cas de présence d'EAE visibles, un lavage à haute pression (3 000 à 3 500 lb/po²) est effectué. Généralement, on décontamine l'équipement en l'immergeant dans l'eau chaude (50 ou 60 °C) pendant au moins 10 minutes. Les utilisateurs peuvent effectuer une décontamination par eux-mêmes en suivant les procédures similaires décrites aux annexes B et C du *Règlement sur les espèces aquatiques envahissantes* du Manitoba pour les embarcations et l'équipement, respectivement (Government of Manitoba 2021a).

Contrairement à la côte ouest, aucune station d'inspection des embarcations n'est actuellement en place dans l'est du Canada. Dans un guide de pratiques exemplaires publié récemment pour prévenir l'introduction et la propagation des EAE (plantes, animaux et micro-organismes), le gouvernement du Québec (MFFP 2018) recommande également d'utiliser un jet d'eau chaude (60 °C) pendant 10 secondes, mais à une pression inférieure (2 600 lb/po²) que celle appliquée dans les provinces de l'Ouest, toutefois semblable aux recommandations de l'*Aquatic Nuisance Species Task Force* (2013).

3.6.1.3. Protocoles de décontamination de l'équipement

Plusieurs provinces et États recommandent une série d'options pour décontaminer l'équipement, y compris l'immersion dans de l'eau chaude ou des solutions chimiques, le séchage à l'air ou la congélation. Le *Michigan Department of Environmental Quality* (2014) et le gouvernement du Manitoba (2021a) recommandent de rincer l'équipement dans de l'eau à une température de 60 °C pendant 5 ou 10 minutes, respectivement. Les durées de séchage recommandées étaient généralement de 5 jours (ANSTF 2013; Minnesota Department of Natural Resources 2017; MFFP 2018; Wisconsin Department of Natural Resources 2020), mais variaient jusqu'à 14 jours pour les périodes hivernales plus froides (Utah Department of Natural Resources 2012). Les durées de congélation recommandées allaient d'aussi peu que 4 heures (DiVittorio *et al.* 2012) à 3 jours (Utah Department of Natural Resources 2012; Government of Manitoba 2021a).

En ce qui concerne les traitements chimiques, le gouvernement du Manitoba (2021a) recommande les options suivantes pour décontaminer l'équipement : eau de Javel (100 ml d'eau de Javel dans un litre d'eau = hypochlorite de sodium à 0,525 %, 30 minutes), vinaigre (sans dilution, équivalent à de l'acide acétique à 5 %, 60 minutes), peroxyde d'hydrogène (64 ml de H₂O₂ à 7 % dans un litre d'eau = 0,448 %, 60 minutes), sel (10 ml de NaCl dissous dans un litre d'eau = 10 ppm, 24 heures) et congélation (-10 °C, 3 jours). De même, le MFFP (2018) énumère plusieurs options, notamment l'eau de Javel (100 ml d'eau de Javel dans un litre d'eau = hypochlorite de sodium à 0,525 %, 10 minutes), le vinaigre (750 ml de vinaigre [acide acétique à 5 %]) dans un litre d'eau = acide acétique à 3,75 %, 20 minutes), le séchage à l'air (5 jours) et la congélation (-9 °C au maximum, 8 heures).

Dans certains cas, le choix dépend du niveau de risque, ainsi que de l'équipement et des composants de l'embarcation. Par exemple, au Wisconsin, lorsqu'on travaille dans des plans d'eau connus pour contenir certaines espèces envahissantes, il est obligatoire d'utiliser une méthode de désinfection efficace pour ces espèces (Wisconsin Department of Natural Resources 2016), telles qu'elles sont décrites dans les pratiques de gestion exemplaires disponibles sur le site du [Wisconsin Department of Natural Resources](http://www.dnr.wisconsin.gov/).

3.6.2. Protocoles de décontamination pour les espèces aquatiques envahissantes marines

Nous avons trouvé très peu de protocoles ou de lignes directrices sur la gestion des bioalissures (autre que le nettoyage à l'eau) en milieu marin afin de réduire les risques de propagation des EAE marines. Bien qu'ils aient été élaborés principalement pour différentes applications (par exemple, activités liées à l'aquaculture, évaluations des risques à l'arrivée des embarcations), ils présentent des éléments pertinents au sujet des pratiques de gestion des bioalissures, conformes à l'approche « Lavez, videz et séchez » (LVS).

Sur la côte est du Canada, le personnel du MPO a rédigé une ébauche de protocole pour les opérations sur le terrain dans les eaux côtières et intérieures des provinces des Maritimes, du Québec et de Terre-Neuve-et-Labrador infestées par des EAE, afin d'atténuer les risques de propagation par les embarcations et d'autres équipements (MPO, C. Mills, comm. pers.). Ce protocole recommande que le personnel du MPO inspecte ses embarcations, ses moteurs et ses remorques; enlève les plantes et les animaux encrassants et les élimine en les plaçant dans un conteneur à ordures; vide l'eau du moteur, des cales, des viviers et d'autres endroits qui contiennent de l'eau; nettoie les embarcations et l'équipement par des jets de vinaigre (acide acétique à 4 ou 5 %) ou d'eau douce à basse pression (pulvérisateur de jardin à pompe à main) suivis d'un séchage à l'air d'au moins une heure; et applique une peinture antisalissures sur les embarcations.

À Terre-Neuve-et-Labrador, le groupe responsable des EAE au sein de la Direction des sciences du MPO (MPO, C. McKenzie, comm. pers.) a élaboré un protocole à l'intention des chercheurs pour prévenir la propagation des EAE par les navires de recherche. Ce document présente des recommandations pour la planification, l'inspection, le nettoyage, la vidange et le séchage appropriés afin d'atténuer le risque d'invasion par des EAE en réduisant la probabilité de nouvelles introductions dans les zones non touchées. À titre d'exemple de planification appropriée, lorsque des travaux d'échantillonnage sont effectués dans des zones où des EAE sont présentes, le protocole recommande de réserver certains équipements pour les utiliser exclusivement dans ces zones. Il recommande également d'inspecter entièrement les embarcations (moteurs, hélices, ancres, coque, pont, cale, etc.), la remorque et l'équipement (cordes, chaînes, flotteurs, pare-chocs, équipement d'échantillonnage) et d'enlever à la main tout organisme aquatique visible. Enfin, les dernières étapes de ce protocole sont conformes à l'approche LVS et recommandent de nettoyer et de vider les embarcations, les remorques et l'équipement sur terre; d'enlever toute la matière organique et de drainer l'eau des viviers, des cales et des pompes avec de l'eau douce (par exemple, rincer le moteur avec de l'eau douce pendant 2 minutes), de faire tremper l'équipement dans du vinaigre (à 5 %) et de laisser sécher complètement l'embarcation, la remorque et l'équipement avant d'entrer dans un autre plan d'eau.

Bien qu'elles n'aient pas été élaborées pour la décontamination des embarcations, le Comité des introductions et des transferts du MPO à l'Île-du-Prince-Édouard, en collaboration avec le ministère des Pêches et des Collectivités (Division de l'aquaculture) de l'Île-du-Prince-Édouard et la *PEI Aquaculture Alliance*, recommande plusieurs options de traitement pour réduire le risque de transfert d'EAE sur les mollusques et crustacés et le matériel d'aquaculture entre les

plans d'eau (A. Ramsay, comm. pers.). Par exemple, pour réduire le risque de transfert de tuniciers coloniaux (*B. schlosseri* et *B. violaceus*) sur les mollusques et l'équipement d'aquaculture introduits dans d'autres plans d'eau non infestés par ces EAE, ils suggèrent soit une immersion dans une combinaison de saumure (300 ppm) et de chaux hydratée à 4 % (30 secondes), suivie d'un séchage à l'air d'au moins une heure (pour les naissains d'huîtres et les adultes), soit un trempage dans l'eau douce pendant 24 heures avec écoulement continu d'eau douce (pour les naissains de moules), soit une immersion dans une saumure à 100 % (30 secondes), suivie d'un séchage à l'air d'au moins une heure (pour les moules adultes). De même, pour les transferts d'huîtres seulement, ils recommandent l'immersion dans de la chaux hydratée à 4 % (30 secondes), suivie d'un séchage à l'air d'au moins une heure pour tuer l'ascidie plissée (*S. clava*) sur les naissains et les adultes.

La [Western Regional Panel on Aquatic Nuisance Species](#), qui regroupe 19 États américains et quatre provinces canadiennes, a rédigé des pratiques exemplaires pour la gestion des bioalissures qui recommandent ce qui suit : 1) appliquer un revêtement antisalissures approuvé afin de réduire la croissance des bioalissures; 2) nettoyer les embarcations et l'équipement avant de se déplacer d'une région à l'autre afin de réduire la probabilité d'introduire des EAE; 3) nettoyer les embarcations dans les stations certifiées; 4) élaborer un plan de gestion des bioalissures pour les embarcations (par exemple, registre des bioalissures).

Le gouvernement australien a élaboré des lignes directrices nationales sur les bioalissures pour aider les propriétaires et les conducteurs de bateaux de plaisance à réduire le risque de propagation des EAE marines en gérant les bioalissures sur leurs bateaux et leurs remorques (Marine Pest Sectoral Committee 2018a, b). Ces lignes directrices, semblables aux protocoles LVS en eau douce, recommandent que l'on prenne les précautions suivantes avant de déplacer l'équipement de navigation à un autre emplacement : enlever les bioalissures enchevêtrées ou fixées (par exemple, les algues) ou la boue et les sédiments du bateau et de la remorque; rincer le bateau (l'intérieur et l'extérieur) et la remorque à l'eau douce; laver le bateau à l'aide d'un chiffon doux pour enlever la couche visqueuse; rincer les systèmes d'eau de mer internes en nettoyant les points d'entrée et de sortie et en les inondant d'eau douce; vider complètement et sécher pendant 48 heures.

En Suède, un guide sur les pratiques exemplaires pour gérer les bioalissures a été élaboré pour la mer Baltique (Watermann *et al.* 2021). Lors du déplacement des bateaux vers une autre région aquatique par voie terrestre, il est recommandé d'enlever tous les matériaux attachés (non autorisés à entrer dans l'eau) et de nettoyer les bateaux (coque et zones de niche) et les remorques à l'aide d'éponges et de nettoyeurs à pression. La meilleure méthode indiquée pour éliminer les bioalissures, en particulier pour les zones cachées, est un jet d'eau chaude à haute pression pendant plusieurs secondes (plus de 60 °C pendant 5 secondes). Il est également recommandé de laisser la remorque sécher avant de l'immerger dans un nouveau plan d'eau.

À l'échelle internationale, l'Organisation maritime internationale (OMI) a élaboré des lignes directrices volontaires, semblables aux protocoles LVS en eau douce, pour le contrôle et la gestion des bioalissures sur les embarcations de plaisance afin de réduire le transfert d'EAE d'un plan d'eau à un autre sur les bateaux, les remorques ou l'équipement (OMI 2012). Après avoir retiré le bateau de l'eau et avant de le transporter vers un autre plan d'eau ou de l'entreposer sur la terre ferme, ces lignes directrices recommandent de retirer les bioalissures (par exemple, algues, balanes, moules) de l'embarcation, de l'équipement et de la remorque; de vider les compartiments de la coque, les moteurs hors-bord et la tuyauterie; de rincer l'intérieur et l'extérieur de l'embarcation avec de l'eau douce et, si possible, de sécher toutes les zones avant le transport; de jeter les bioalissures et les eaux usées à terre à des endroits où elles ne

peuvent pas se déverser dans l'eau ou les drains; et d'inspecter, de nettoyer et de sécher l'équipement après chaque voyage ou sortie.

4. DISCUSSION

Dans le présent document, nous donnons des renseignements détaillés sur les traitements de décontamination qui sont létaux pour différentes EAE et, bien que plusieurs traitements aient été jugés efficaces, ils étaient fondamentalement propres à l'espèce et à l'environnement, avec de grandes plages de mortalité associée. L'efficacité était fonction du type d'embarcation ou d'équipement, du type de traitement, de la durée, de l'intensité et de la méthode d'application, ainsi que de l'espèce, entre autres facteurs. Pour qu'un traitement donné soit efficace pour tuer le plus grand nombre possible des EAE ciblées, il fallait habituellement appliquer des traitements plus sévères que ceux nécessaires pour une EAE en particulier, comme des températures plus élevées, des concentrations chimiques accrues et des durées d'exposition plus longues. Les traitements de décontamination efficaces pour éliminer/tuer le plus grand nombre d'EAE d'eau douce et marines ont été déterminés à partir des résultats des traitements de décontamination propres à l'espèce présentés dans les tableaux 3 à 7 pour faciliter les décisions de gestion futures. Les options pour la décontamination des embarcations et de l'équipement sont présentées dans les tableaux 9 et 10 pour les EAE d'eau douce et dans les tableaux 11 et 12 pour les EAE marines. Les niveaux d'incertitude associés sont présentés pour chaque EAE et traitement de décontamination. Les tableaux 13 et 15 récapitulent les compatibilités et la faisabilité des traitements, car ces derniers ne seront pas tous facilement applicables à toutes les situations.

4.1. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION LÉTAUX POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES D'EAU DOUCE

Dans le cas des espèces envahissantes d'eau douce, la majorité des protocoles et des traitements de décontamination décrits dans la littérature scientifique étaient axés sur la lutte contre les moules zébrées et quaggas, vraisemblablement en raison de leur long historique d'invasion et de leurs importantes répercussions écologiques et socioéconomiques en Amérique du Nord. À quelques exceptions près, les publications primaires appuyaient les recommandations des protocoles provinciaux, et les jets d'eau chaude ou immersions dans de l'eau chaude, le séchage à l'air et les applications d'hypochlorite de sodium étaient les traitements les plus fréquemment étudiés.

Les jets d'eau chaude sous pression sont largement utilisés pour décontaminer les embarcations, mais s'accompagnent d'une incertitude élevée du fait du nombre limité d'études et des résultats contradictoires. Pour le milieu dulcicole, nous n'avons trouvé que trois études sur les pressions efficaces pour éliminer ou tuer les EAE. Elles ont montré que les jets à haute pression étaient plus efficaces ou plus rapides que les jets à basse pression pour éliminer les EAE d'eau douce comme la moule zébrée, les fragments de plantes et les petits organismes des embarcations (1 800 contre 40 lb/po², Rothlisberger *et al.* 2010; 3 000 contre 1 500 lb/po², Wong *et al.* 2014). Cependant, dans une étude récente, Mohit (2021) suggère que les hautes pressions (1 950 lb/po²) pourraient être moins efficaces que les pressions moyennes (900 à 1 200 lb/po²), car les pressions plus élevées causent des éclaboussures et la redistribution des matériaux sur les surfaces. Les résultats contradictoires peuvent être attribuables à différentes méthodologies (études sur le terrain utilisant des jets à haute pression sur des embarcations souillées [Wong *et al.* 2014] versus des expériences contrôlées sur le terrain dans lesquelles le périphyton était cultivé sur des surfaces ou des matériaux végétaux fixés artificiellement à des surfaces (Mohit 2021). L'incertitude ne concerne pas seulement les pressions, mais aussi les températures qui sont létales pour les EAE. Par exemple, trois études (Morse *et al.* 2009;

Comeau *et al.* 2011; Wong *et al.* 2014) ont rapporté que les jets d'eau à 60 °C pendant 10 secondes étaient létaux pour les moules de la famille des dreissenidés, mais une étude récente (Bradbeer *et al.* 2021) a signalé qu'ils étaient insuffisants (mortalité de 50 % pour des jets à 59 °C pendant 10 secondes) et que des durées d'exposition à de l'eau plus chaude (68 °C) pendant plus longtemps (15 secondes) étaient nécessaires pour tuer la moule zébrée avec une efficacité de 100 %. Cela met en évidence la nécessité de mener d'autres recherches (idéalement sur le terrain) sur les pressions et les températures efficaces pour tuer la moule zébrée et les autres EAE ciblées et, par conséquent, de s'assurer de l'efficacité des recommandations formulées dans les protocoles actuellement appliqués (par exemple, eau à 60 °C et 3 000 lb/po² pendant 10 secondes dans le protocole UMPS IV, Elwell et Phillips 2021). Dans l'ensemble, la littérature scientifique suggère que les jets d'eau chaude sous pression (68 °C, 15 secondes, 1 600 lb/po²) seront efficaces pour tuer la moule zébrée et la crevette tueuse (incertitude élevée), ainsi que la moule quagga (incertitude très élevée). Aucune donnée n'était disponible pour les autres espèces ciblées.

L'immersion dans de l'eau chaude était également jugée létale pour plusieurs EAE d'eau douce. Bien qu'elle ne soit actuellement pas facile à appliquer à la décontamination des embarcations, l'immersion dans de l'eau chaude peut être efficace pour décontaminer l'équipement et les zones difficiles d'accès des embarcations (par exemple, les citernes de ballast, les viviers pour appâts vivants et les cales). La littérature scientifique indiquait que différentes combinaisons de température et d'exposition étaient efficaces pour plusieurs EAE. Bien que de courtes périodes d'exposition dans de l'eau chaude (50 °C) aient été létales pour les moules zébrées et quaggas (une minute, Beyer *et al.* 2011) et la nasse de Nouvelle-Zélande (15 secondes, Dwyer *et al.* 2003), des durées d'immersion plus longues ou des températures plus élevées étaient nécessaires pour d'autres EAE. Un examen récent des pratiques de décontamination en Amérique du Nord (Mohit *et al.* 2021) a permis de conclure que l'immersion dans de l'eau à 50 °C pendant 15 minutes entraînait une mortalité de 100 % chez les moules, les petits invertébrés et certaines plantes. Notre examen a révélé que des températures plus chaudes (par exemple, 60 °C) réduisaient la durée (par exemple, 5 minutes) requise pour provoquer la mortalité et étaient létales pour un plus grand nombre d'espèces, en particulier certains macrophytes pour lesquels des températures inférieures à 60 °C étaient inefficaces (par exemple, le myriophylle à épis). Des températures encore plus élevées, de 75 et 90°C respectivement, étaient nécessaires pour tuer les myxospores (juvéniles) et les triactinomyoxines (adultes) de *M. cerebralis*, le parasite qui cause la maladie du tournis chez le saumon et la truite d'élevage, de même que chez les poissons sauvages. Les protocoles de plusieurs États et provinces recommandent actuellement de décontaminer l'équipement par immersion dans de l'eau chaude (60 °C) pendant 10 minutes, ce qui est conforme à la littérature scientifique sur les traitements létaux pour plusieurs EAE. Les eaux stagnantes des embarcations de plaisance peuvent également abriter des EAE, en particulier les stades planctoniques (Johnson *et al.* 2001; Kelly *et al.* 2013), et l'inondation des compartiments avec de l'eau chaude peut être un moyen approprié de décontamination. Les protocoles de plusieurs États et provinces (par exemple, UMPS IV, Elwell et Phillips 2021) recommandent de rincer les citernes de ballast des embarcations, les viviers pour appâts vivants et les cales pendant 120 à 130 secondes avec de l'eau chaude (49 °C). Toutefois, il faudrait faire passer ces durées d'immersion à 15 minutes (à 50 °C) ou à 5 minutes (à 60 °C) pour tuer le plus grand nombre d'EAE. Il est important de noter que la température appropriée doit être maintenue pendant toute la durée de l'immersion pour que la décontamination soit efficace. Ainsi, conformément à plusieurs protocoles LVS+D, l'immersion dans de l'eau chaude (60 °C, 5 minutes) pourrait être efficace pour tuer la moule zébrée, la moule quagga, la crevette tueuse, les puces d'eau et certains macrophytes (avec une incertitude raisonnable), la petite corbeille d'Asie, la nasse de Nouvelle-Zélande et la crevette rouge sang (avec une incertitude élevée). Aucune donnée

n'était disponible pour plusieurs des premiers stades biologiques des invertébrés et certains macrophytes.

Le séchage des embarcations et de l'équipement est l'une des trois étapes importantes des programmes de sensibilisation aux protocoles LVS qui s'adressent au public, mais bon nombre d'entre eux ne définissent pas clairement ce qu'on entend exactement par « séchage » (par exemple, au moyen d'une serviette, d'un aspirateur pour débris secs ou liquides et d'air sous pression ou durée de séchage à l'air). La littérature scientifique a montré que le séchage à l'air peut être un moyen efficace de décontamination, mais seulement s'il est appliqué pendant la durée appropriée pour les conditions de température et d'humidité relative données et pour le stade biologique des EAE. En général, les durées de séchage à l'air létales pour les EAE d'eau douce étaient plus courtes dans des conditions chaudes (par exemple, de 1 à 7 jours) que dans des conditions plus froides (de 6 à 15 jours), mais elles étaient influencées par l'humidité relative. Une humidité relative élevée permet aux EAE de tolérer le séchage pendant plus longtemps et, chez les invertébrés, les individus grands ou âgés étaient plus résistants au séchage que les individus petits ou jeunes (Ricciardi *et al.* 1995; Richards *et al.* 2004; Collas *et al.* 2014; Snider *et al.* 2014). La morphologie des fragments de macrophytes influençait également l'efficacité, les fragments enroulés demeurant viables plus longtemps que les fragments simples ou non spiralés (Jerde *et al.* 2012; Bruckerhoff *et al.* 2015). Bien que dépendant d'un certain nombre de facteurs (par exemple, l'humidité relative, le stade biologique et la température), le séchage à l'air pendant 7 jours (températures chaudes, de 20 à 35 °C) pourrait être mortel, avec une incertitude raisonnable, pour les moules de la famille des dreissenidés, la nasse de Nouvelle-Zélande, *M. cerebralis* et plusieurs macrophytes, et avec une incertitude plus élevée pour la petite corbeille d'Asie, la crevette rouge sang et les puces d'eau. Des durées de séchage plus longues étaient nécessaires pour être efficaces dans des conditions froides, et une incertitude plus élevée, allant de raisonnable à très élevée, était associée au séchage à l'air entre 10 et 19 °C pendant 15 jours, en particulier pour la petite corbeille d'Asie et la crevette tueuse (incertitude très élevée), car ce traitement n'était pas léthal à 100 % ou les résultats étaient contradictoires entre les études. Aucune donnée n'était disponible pour plusieurs des premiers stades biologiques des invertébrés. Les recommandations énoncées dans les protocoles des gouvernements ou des États faisaient généralement écho à la littérature scientifique qui suggérait de laisser les embarcations et l'équipement sécher à l'air pendant 5 jours en été ou 14 jours en hiver. Ces recommandations pourraient être portées à 7 jours (été) et à 15 jours (hiver) pour être efficaces pour un plus grand nombre d'espèces envahissantes en milieu dulcicole et de stades biologiques.

La congélation pourrait être une option de décontamination si les embarcations peuvent être laissées dans des environnements froids ou si l'équipement peut être placé dans des congélateurs à la température et pendant la durée appropriées. Nous n'avons trouvé des études sur l'efficacité de la congélation que pour quelques espèces, et elles montraient que la congélation était létale après une exposition de seulement 30 minutes (par exemple, moule zébrée à -10 °C; Payne *et al.* 1992) alors qu'il fallait 4 jours pour tuer certaines espèces (par exemple, la nasse de Nouvelle-Zélande entre -8 et -14 °C; Cheng et LeClair 2011). Même si les durées de congélation létale étaient plus courtes pour la moule zébrée, elles dépendaient de la température et de si les moules étaient isolées ou regroupées (McMahon *et al.* 1993). Les recommandations pour la congélation variaient généralement de quatre heures à trois jours dans les protocoles appliqués par les gouvernements et les États et pourraient donc être insuffisantes pour tuer toutes les EAE (par exemple, la nasse de Nouvelle-Zélande). Dans l'ensemble, la littérature suggère que la congélation (-20 °C) pendant 4 jours sera efficace pour tuer la moule zébrée, la nasse de Nouvelle-Zélande, le cladocère épineux (adultes soumis à des jets et œufs congelés dans l'eau – pas dans l'air) et *M. cerebralis* (incertitude élevée).

Cependant, aucune donnée n'était disponible pour la moule quagga, la petite corbeille d'Asie, la crevette rouge sang, la crevette tueuse ou les espèces de macrophytes.

En Amérique du Nord, on utilise de l'hypochlorite de sodium pour tuer les moules de la famille des dreissenidés, car la chloration est une méthode efficace, économique et utilisée traditionnellement pour contrôler les biosalissures dans les structures de prises d'eau industrielles (voir McMahan *et al.* 1994). C'est pourquoi on cite souvent l'hypochlorite de sodium comme une méthode efficace, habituellement à des concentrations variant de 0,25 à 5 % (eau de Javel = hypochlorite de sodium entre 5 et 6 %) pendant 5 à 30 minutes, dans les rapports et les sources gouvernementales, ou comme une bonne solution de rechange à des méthodes de décontamination plus efficaces (par exemple, vapeur, congélation) si elles ne sont pas accessibles (Miller *et al.* 2006; Cockman *et al.* 2012; Michigan Department of Environmental Quality 2014; New York State Department of Environmental Conservation 2015; Alberta Environmental and Parks 2017; MFFP 2018; Lake Stewards of Maine 2019; Wisconsin Department of Natural Resources 2020). Bien qu'il existe une longue histoire de recherche sur la chloration continue à faible concentration pour lutter contre les biosalissures industrielles, y compris les moules (par exemple, Greenshields et Ridley 1957; Klerks et Fraleigh 1991; Harrington *et al.* 1997) et la petite corbeille d'Asie (par exemple, Doherty *et al.* 1968; Bernhard *et al.* 1986; Ramsay *et al.* 1988), comparativement moins d'études ont porté sur les applications de concentrations aiguës plus élevées pour la décontamination des embarcations et de l'équipement dans le contexte de la biosécurité, malgré leur inclusion dans de nombreux protocoles LVS+D. Il n'y avait pas de littérature scientifique sur l'immersion à court terme dans l'hypochlorite de sodium pour la lutte contre les moules zébrées ou quagga ou la majorité des espèces de macrophytes, et seules deux études ont examiné sa létalité sur les espèces de zooplancton après des immersions de 20 minutes dans des concentrations de 0,02 à 5 % (Sebire *et al.* 2018; De Stasio *et al.* 2019). Les stades de juvénile et d'adulte du parasite responsable de la maladie du tournis étaient effectivement tués après des immersions à des concentrations plus faibles (0,00026 à 0,5 %) pendant une période semblable (Wagner *et al.* 2002, 2003; Hedrick *et al.* 2008), mais les mêmes traitements étaient inefficaces contre la nasse de Nouvelle-Zélande (De Stasio *et al.* 2019) et la petite corbeille d'Asie (Mattice *et al.* 1982; Barbour *et al.* 2015; Coughlan *et al.* 2019). Un examen des données permet de penser que les immersions à court terme dans des solutions plus concentrées sont probablement également efficaces pour la moule zébrée (plus élevées de plusieurs ordres de grandeur que les concentrations testées dans la littérature, mais pendant des durées d'exposition plus courtes). Par conséquent, conformément à certains protocoles LVS+D, la littérature suggère que 20 minutes d'immersion dans de l'hypochlorite de sodium à 0,25 % seront efficaces pour tuer tous les stades du parasite responsable de la maladie du tournis (incertitude raisonnable), la moule zébrée, la crevette rouge sang et les deux espèces de puces d'eau (incertitude élevée), ainsi que la crevette tueuse (incertitude très élevée), mais il est peu probable qu'elle tue la petite corbeille d'Asie, la nasse de Nouvelle-Zélande ou le myriophylle à épis. Aucune donnée n'était disponible sur la moule quagga et sur les autres espèces de macrophytes.

L'acide acétique est un produit chimique peu coûteux et facilement accessible au grand public (vinaigre = acide acétique à 5 %), qui est mentionné dans les protocoles LVS+D de certaines provinces (MFFP 2018; Government of British Columbia 2020b, 2020c; Government of Manitoba 2021a) et de certains États (DiVittorio *et al.* 2012; Michigan Department of Environmental Quality 2014; Department of Natural Resources 2020) comme efficace, essentiellement pour lutter contre les larves de moule zébrée sur l'équipement (voir le tableau 8; de 3,75 à 5 % pendant 10 à 60 minutes). Nous n'avons trouvé dans la littérature qu'un seul article de recherche primaire et une seule thèse qui quantifiaient la létalité de l'immersion dans de l'acide acétique pour la moule zébrée (adultes : Davis *et al.* 2015a; larves véligères : Davis 2016), ce qui donne à penser qu'une immersion d'une heure à une

concentration de 5 % (c'est-à-dire dans du vinaigre) est efficace pour tuer les moules zébrées juvéniles et adultes, mais avec une incertitude associée élevée. Aucune donnée n'était disponible pour les autres espèces ciblées.

Les CAQ sont des substances utilisées régulièrement comme biocides, pesticides et désinfectants qui nuisent aux fonctions de la membrane des branchies des organismes aquatiques (Schisler *et al.* 2008). Ils constituent un ingrédient clé des molluscicides industriels utilisés pour empêcher les bio-salissures dans les systèmes de refroidissement (Dobbs *et al.* 1995). Seuls deux protocoles LVS+D recommandent leur utilisation : celui du gouvernement de l'Alberta (2020) pour cibler le parasite responsable de la maladie du tournis sur les motomarines et l'équipement (trempage à 0,15 % ou jet à 0,3 % pendant 10 minutes) et celui du *Michigan Department of Environmental Quality* (2014) pour cibler la nasse de Nouvelle-Zélande sur les petits équipements (immersion de 10 minutes à 0,3 %). L'utilisation des CAQ pour le contrôle de la nasse de Nouvelle-Zélande est bien représentée dans la littérature et malgré un consensus total sur des régimes de traitement efficaces, les données appuient le protocole du *Michigan Department of Environmental Quality*, avec des concentrations de 0,24 à 0,4 % ou plus pendant plus de 5 minutes, provoquant une mortalité de 100 % chez la nasse de Nouvelle-Zélande adulte, avec une incertitude raisonnable. Une seule (Hedrick *et al.* 2008) des trois études examinées par des pairs sur les applications de CAQ pour tuer le parasite responsable de la maladie du tournis appuie le protocole proposé par le gouvernement de l'Alberta, et indique que les immersions dans des solutions de CAQ à 0,15 % pendant 10 minutes seraient mortelles pour les juvéniles et les adultes, avec une incertitude élevée. À l'instar des traitements à l'hypochlorite de sodium, sur les quatre études trouvées dans la littérature sur les applications de CAQ pour le contrôle des moules de la famille des dreissenidés, trois (deux publications primaires, un rapport technique) étaient des expositions par immersion chronique à faible dose et à long terme pour contrôler la moule zébrée (Martin *et al.* 1993a, 1993b; McMahan *et al.* 1994). Une seule étude était disponible sur l'immersion aiguë, dans laquelle on obtenait une mortalité de 100 % des larves véligères de moule quagga après une immersion de 10 minutes dans une solution à 0,4 % de CAQ (Britton et Dingman 2011). L'examen des données donne à penser qu'une immersion de 10 minutes dans une solution à 0,4 % de CAQ est probablement aussi efficace pour les larves véligères de moule zébrée et quagga et les premiers stades biologiques du parasite responsable de la maladie du tournis, avec une incertitude élevée en raison de la quantité et de la qualité des données disponibles dans la littérature. Ce traitement représente une immersion à court terme à plus forte concentration, de plusieurs ordres de grandeur plus élevée que celles testées sur la moule zébrée dans la littérature, mais avec des durées d'exposition plus courtes. De même, on obtiendra une mortalité de 100 % chez la nasse de Nouvelle-Zélande avec une incertitude raisonnable. L'immersion dans des solutions de CAQ n'est toutefois pas efficace pour les macrophytes envahissants, et les données sur les autres espèces ciblées sont insuffisantes.

L'immersion dans de l'eau salée est une approche définie dans plusieurs protocoles LVS+D, visant principalement à tuer les larves de moules de la famille des dreissenidés. Cependant, les durées d'immersion et les concentrations de sel qui y sont indiquées ne sont pas entièrement corroborées par la littérature. Alors que des immersions pendant 24 heures à des concentrations de sel de 10 ppm (préconisées dans Gouvernement du Manitoba 2021a et DiVittorio *et al.* 2012) seraient létales à 100 % pour les larves véligères de moule zébrée, des immersions de 30 minutes dans une solution à 35 ppm (ANSTF 2013) ou 4 ppm (Michigan Department of Environmental Quality 2014) ne le seraient pas. Les moules de la famille des dreissenidés adultes sont beaucoup plus difficiles à tuer et des durées d'immersion prolongées (même à des concentrations élevées de sel) sont nécessaires, ce qui peut s'expliquer par des réactions comportementales comme la fermeture des valves en réponse aux agents de stress osmotique (Nicastro *et al.* 2010; McFarland *et al.* 2015). Bien que de courtes immersions se

soient révélées efficaces pour tuer certaines espèces de zooplancton (Ellis et Maclsaac 2009), dans la plupart des cas, les traitements à l'eau salée étaient entièrement inefficaces (petite corbeille d'Asie; Barbour *et al.* 2013; Coughlan *et al.* 2019) ou exigeaient des durées d'exposition particulièrement longues (moules adultes) pour être létales. Cela n'est peut-être pas surprenant, car de nombreuses EAE d'eau douce ont des tolérances intrinsèquement larges à la salinité (Ricciardi 2006; Ricciardi et Rasmussen 1998; Maclsaac *et al.* 2002; Ellis et Pattisina 2009; Pagnucco *et al.* 2015), souvent en raison de changements à long terme du climat ou du cycle biologique (Strayer et Smith 1993; Reid et Orlova 2002). Combiné à un manque de données pour les autres EAE ciblées, ce point suggère que les immersions dans de l'eau salée ne sont pas des traitements de décontamination utiles pour lutter contre les EAE d'eau douce.

Bien que le Virkon^{MD} soit généralement utilisé comme un germicide à large spectre pour le nettoyage et la désinfection, il a récemment été envisagé dans le contexte de la biosécurité (voir Barbour *et al.* 2013). Quatre protocoles LVS+D préconisent de l'utiliser à des concentrations de 2 % pendant 20 minutes, principalement pour la lutte contre la nasse de Nouvelle-Zélande (Michigan Department of Environmental Quality 2014; Washington Department of Fish and Wildlife 2016; gouvernement de l'Alberta 2020; Wisconsin Department of Natural Resources 2020). La littérature appuie cette application du traitement, montrant une mortalité de 100 % chez les juvéniles et adultes de la nasse de Nouvelle-Zélande (Stockton 2011; Stockton et Moffitt 2013; De Stasio *et al.* 2019), les deux espèces de puces d'eau, la crevette rouge sang (De Stasio *et al.* 2019) et la crevette tueuse (Bradbeer *et al.* 2020). Comparativement, les moules quaggas adultes et les larves véligères des deux espèces de moules de la famille des dreissenidés étaient tuées beaucoup plus rapidement (2 à 10 minutes) après une immersion à des concentrations semblables (Stockton 2011; Moffitt *et al.* 2015; Davis 2016), mais il fallait plus de 90 minutes pour tuer les moules zébrées adultes (Coughlan *et al.* 2020b). Des résultats contradictoires ont été observés pour la petite corbeille d'Asie, pour laquelle une immersion à la même concentration pendant 5 minutes était soit très efficace (Barbour *et al.* 2013), soit complètement inefficace (même après 80 minutes; Coughlan *et al.* 2019). Compte tenu de la durée plus longue requise pour induire une mortalité de 100 % chez les moules zébrées adultes, une immersion de 90 minutes à une concentration plus élevée de Virkon^{MD} à 4 % sera létale pour le plus grand nombre d'espèces ciblées, y compris les deux stades de la moule zébrée, la nasse de Nouvelle-Zélande, la crevette rouge sang et la crevette tueuse (incertitude raisonnable), l'élodée dense et les deux stades de la moule quagga et des espèces de puces d'eau (incertitude élevée) et possiblement la petite corbeille d'Asie adulte (incertitude élevée). Aucune donnée n'était disponible pour la majorité des macrophytes ou le parasite *M. cerebralis*.

4.2. TRAITEMENTS DE DÉCONTAMINATION LÉTAUX POUR LES ESPÈCES AQUATIQUES ENVAHISSANTES MARINES

Bien que les protocoles pour les espèces marines aient surtout été élaborés pour des applications différentes (par exemple, activités liées à l'aquaculture, évaluations des risques à l'arrivée d'embarcations), ils comprennent des pratiques de gestion qui sont conformes à une approche LVS+D. Le jet d'eau chaude sous pression, le jet d'eau douce ou l'immersion dans de l'eau douce ainsi que l'immersion dans de l'acide acétique, la saumure et la chaux hydratée sont recommandés dans plusieurs protocoles de décontamination. Ces méthodes sont efficaces pour tuer plusieurs EAE si les durées d'exposition sont appropriées. Toutefois, il n'a pas toujours été possible de déterminer si un protocole donné était appuyé par la littérature scientifique, car il manquait parfois des renseignements détaillés (par exemple, la durée d'exposition ou la concentration).

Les traitements à l'eau douce sont sécuritaires et faciles à appliquer et pourraient être un outil utile pour contrôler de nombreuses EAE marines. Plusieurs publications primaires et rapports techniques indiquaient l'immersion dans de l'eau douce comme un traitement efficace contre les tuniciers coloniaux et solitaires, avec des cotes d'incertitude de faible à raisonnable. Cependant, il n'y a pas de consensus dans la littérature sur les durées d'immersion efficaces pour atteindre une mortalité de 100 %, avec une variation (de plus de 3 heures à 24 heures) entre les espèces de tuniciers et au sein de celles-ci (Coutts et Forrest 2005; MacNair *et al.* 2006; Dijkstra *et al.* 2008; Carman *et al.* 2010; McCann *et al.* 2013; Ramsay 2015a, b, c; Carman *et al.* 2016). Plusieurs études précisaient que l'efficacité était accrue lorsque les tuniciers étaient exposés à l'air après une immersion dans de l'eau douce (Denny 2008; Carman *et al.* 2016; Rolheiser *et al.* 2012). Les traitements par immersion dans de l'eau douce étaient aussi généralement efficaces, avec une incertitude élevée, pour tuer les taxons de macroalgues (Forrest et Blakemore 2006; Kim et Garbary 2007; Landry *et al.* données non publiées), mais inefficaces contre la moule bleue (Forrest et Blakemore 2006; Carman *et al.* 2016; Landry *et al.* MPO, données non publiées). Nous n'avons trouvé aucune étude sur les effets du jet d'eau douce sur d'autres taxons (à l'exception d'une étude sur la moule bleue) dans la littérature, bien qu'il soit efficace contre les tuniciers (quoique cette affirmation soit fondée sur seulement deux études; Denny 2008; Carman *et al.* 2016). Dans l'ensemble, une immersion de 24 heures dans de l'eau douce, suivie d'un séchage à l'air d'une heure, serait probablement efficace pour tuer les EAE marines, y compris les tuniciers coloniaux (incertitude faible), les tuniciers solitaires (incertitude raisonnable), ainsi que le *Codium fragile* et les autres macroalgues (incertitude élevée) présents sur l'équipement, car il n'est pas facile, pour l'instant, d'appliquer les traitements sous forme d'immersion aux embarcations. Toutefois, ce traitement est probablement inefficace contre la moule bleue (aux stades d'adulte et de juvénile) et il n'y avait pas de données sur le crabe vert. Quelques protocoles pour le milieu marin recommandent de décontaminer les embarcations et l'équipement connexe par immersion dans de l'eau douce ou jet d'eau douce afin d'atténuer les risques de propagation des EAE, mais un seul (A. Ramsay, comm. pers.) fournit des durées d'exposition et recommande une immersion dans de l'eau douce pendant 24 heures avec écoulement continu d'eau douce pour contrôler les tuniciers coloniaux, ce qui correspond à la littérature scientifique sur les traitements létaux pour plusieurs EAE marines.

Les traitements à l'eau de mer chauffée étaient efficaces pour plusieurs groupes taxonomiques d'EAE marines, avec une incertitude raisonnable à élevée (Gonzalez et Yevich 1976; Rajagopal *et al.* 2005; Forrest et Blakemore 2006; Best *et al.* 2014; Sievers *et al.* 2019). Cependant, les températures et la durée de traitement étaient très variables, et les conclusions différaient entre les tuniciers solitaires (Gill *et al.* 2007; Sievers *et al.* 2019) et les moules bleues adultes (Gonzalez et Yevich 1976; Rajagopal *et al.* 2005; Forrest et Blakemore 2006; Best *et al.* 2014). La mortalité des tuniciers solitaires (*C. intestinalis* et *S. clava*) augmentait avec la température et les durées d'exposition, et une immersion à 60 °C pendant 30 secondes est suffisante pour causer une mortalité de 100 % (avec une incertitude élevée) chez les deux espèces (Sievers *et al.* 2019). Dans l'ensemble, ce même protocole peut également être efficace (avec une incertitude élevée) pour tuer la moule bleue (Rajagopal *et al.* 2005), le crabe vert juvénile (Best *et al.* 2014), le *Codium fragile* (Landry *et al.*, MPO, données non publiées) et quelques autres macroalgues (Forrest et Blakemore 2006). Il n'existe aucune donnée sur la mortalité du crabe vert adulte ou des tuniciers coloniaux associée à l'immersion dans de l'eau de mer chaude et ce traitement n'était pas recommandé pour lutter contre les EAE marines dans les protocoles examinés.

La littérature publiée contenait très peu de renseignements sur les traitements à l'eau de mer sous pression (basse et haute) pour les EAE marines, mais les données disponibles étaient axées sur le retrait des organismes des infrastructures plutôt que sur leur mortalité. Il est donc très difficile de déterminer un traitement de décontamination sous pression qui s'applique à

toutes les espèces, et les cotes d'incertitude associées à ce traitement sont élevées dans la plupart des cas. Un jet à basse pression (40 à 50 lb/po²) pourrait cependant être un traitement efficace, s'il est combiné à une température élevée (Davidson *et al.* 2005; Joyce *et al.* 2019). L'application d'un jet d'eau de mer à basse pression à 100 °C (ou vapeur) pendant 120 secondes pourrait tuer les tuniciers solitaires, les moules bleues adultes et les macroalgues présentes sur l'équipement et les embarcations nautiques, avec une incertitude élevée, mais aucune information n'était disponible pour des traitements semblables sur les tuniciers coloniaux, les moules bleues juvéniles, le crabe vert et le *Codium fragile*.

Quelques publications primaires ont signalé que l'eau de mer sous haute pression (400 à 3 000 lb/po²) pour diverses durées (jusqu'à 30 secondes) pourrait être une méthode très efficace (mais pas toujours à 100 %) pour éliminer les macroalgues et les tuniciers sur les coquilles dans les systèmes d'aquaculture (Forrest et Blakemore 2006; Paetzold *et al.* 2012; Curtis *et al.* 2021). Un rapport technique et une publication primaire ont montré que la combinaison du lavage sous pression (2 000 lb/po²) et du séchage à l'air (48 heures) est une méthode économique pour traiter les mouillages et diverses autres structures artificielles contre les tuniciers (*D. vexillum*) et d'autres espèces non ciblées (Coutts 2006; Coutts et Forrest 2007); on peut en déduire que cette méthode pourrait également être efficace pour décontaminer les embarcations et l'équipement associé. Inglis et ses collaborateurs (2012) ont examiné les options de gestion des embarcations encrassées et déterminé que le lavage sous pression (2 000 lb/po² ou plus) est une technique courante d'élimination des bioalissures, bien que des traitements chimiques supplémentaires puissent être nécessaires dans des zones cachées (par exemple, tuyaux d'entrée, grillages). Compte tenu de ce nombre limité d'études, un lavage au jet à haute pression (2 000 lb/po²) pendant 15 secondes suivi d'un séchage à l'air de 48 heures peut être efficace pour éliminer les tuniciers et les macroalgues (incertitude raisonnable à élevée) de l'équipement ou des embarcations encrassés, mais nous n'avons trouvé aucune donnée pour la moule bleue, le crabe vert et le *Codium fragile*. Nous n'avons pas non plus trouvé d'étude combinant la haute pression et l'eau chaude pour les EAE marines. Cependant, comme diverses études ont montré que l'eau de mer sous pression (Forrest et Blakemore 2006; Paetzold *et al.* 2012; Ramsay 2014) et l'eau chaude (Rajagopal *et al.* 2005; Forrest et Blakemore 2006; Best *et al.* 2014; Sievers *et al.* 2019) étaient efficaces pour plusieurs EAE marines, leur combinaison est probablement tout aussi efficace, voire plus. Au cours d'une intervention rapide, McKenzie et ses collaborateurs (2016) ont constaté que l'application de vapeur, de détergent, puis d'un jet à haute pression (durée et pression non spécifiées) sur un bateau fortement encrassé par *C. intestinalis* était efficace pour tuer ce tunicier. Étant donné le manque de données, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur l'efficacité des jets à basse et à haute pression et des températures sur les EAE marines. Malgré les recommandations énoncées dans différents protocoles pour l'eau douce, seul le guide des pratiques exemplaires élaboré par la Suède (Watermann *et al.* 2021) suggère d'utiliser un jet d'eau chaude à haute pression (60 °C pendant 5 secondes) pour éliminer les EAE marines.

Le séchage à l'air est couramment mentionné dans les ouvrages primaires et secondaires comme une méthode de lutte contre les EAE marines et s'est révélé efficace (bien qu'avec de longues durées d'exposition) pour les bioalissures, en particulier pour les tuniciers coloniaux et solitaires (Coutts et Forrest 2005; MacNair *et al.* 2006; Pannell et Coutts 2007; Carman *et al.* 2010; Hillock et Costello 2013; Hopkins *et al.* 2016, Bernier *et al.*, MPO, données non publiées). Comme l'ont décrit Hillock et Costello (2013) et Inglis et ses collaborateurs (2012), cette méthode est facile à appliquer dans de nombreuses situations, comme la mise en cale sèche des bateaux, les mouillages et l'équipement d'aquaculture et de pêche. Cependant, selon la quantité d'organismes présents, les espèces, les stades et les conditions environnementales locales (température, humidité relative), il pourrait falloir jusqu'à 2 et 8 semaines pour que l'efficacité soit de 100 % pour les tuniciers et les macroalgues, respectivement (Forrest et

Blakemore 2006; voir des exemples de durées de séchage à l'air pour certains groupes dans l'examen de Hilliard et Polglaze 2006). Ainsi, la durée de séchage de 48 heures recommandée par l'*Australian Marine Pest Sectoral Committee* (2018a, b) est probablement insuffisante. Pour un traitement de décontamination efficace sur plusieurs espèces, un traitement de séchage à l'air de 7 jours devrait être suffisant, avec une incertitude raisonnable à élevée, pour tuer la plupart des tuniciers, le crabe vert, la moule bleue et de nombreuses espèces de macroalgues, y compris le *Codium fragile*, présents sur l'équipement et les embarcations. Il convient toutefois de noter que *M. galloprovincialis* avait été utilisé comme substitut pour la moule bleue (Hopkins *et al.* 2016) et que le traitement de 7 jours ne sera efficace contre le crabe vert que si les individus sont entièrement exposés à l'air à 29 °C (Darbyson *et al.* 2009). De plus, un séchage à l'air de plus de 8 semaines pourrait être nécessaire pour les gamétophytes de certaines macroalgues dans certaines conditions (10 °C; humidité relative de 95 %; Forrest et Blakemore 2006).

La vaste gamme des concentrations d'hypochlorite de sodium (de 0,000025 à 1 %) et des durées d'exposition (de 15 secondes à 62 jours) étudiées dans la littérature complique la comparaison de la mortalité chez diverses EAE marines (Rajagopal *et al.* 2002; Coutts et Forrest 2005; MacNair *et al.* 2006; Denny 2008; McCann *et al.* 2013; Haque *et al.* 2014, 2015; Haque et Kwon 2017). De plus, lorsqu'on ajoute de l'hypochlorite de sodium à de l'eau de mer, les ions d'hypobromite et l'acide hypobromeux (les biocides primaires) se forment rapidement, et toutes les matières organiques dans l'eau de mer se lient à ces oxydants, les inactivant (Taylor 2006) et réduisant l'efficacité de l'hypochlorite de sodium en tant que biocide (Piola *et al.* 2009). Certaines études sur les tuniciers coloniaux et la moule bleue suggèrent une relation inverse entre la concentration d'hypochlorite de sodium et la durée d'immersion, les concentrations plus élevées d'hypochlorite de sodium nécessitant des durées d'exposition plus courtes pour produire une mortalité de 100 % (Rajagopal *et al.* 2002, 2003; MacNair *et al.* 2006; McCann *et al.* 2013; Haque *et al.* 2015). Cependant, il a fallu de très longues durées d'exposition (plusieurs jours) à de faibles concentrations pour tuer les moules bleues adultes (Rajagopal *et al.* 2002, 2003; Haque et Kwon 2017), et la taille (ou le stade) des moules est un facteur important pour déterminer la durée d'exposition requise pour provoquer une mortalité de 100 % (Haque *et al.* 2005). Il n'y avait pas de consensus dans la littérature sur les concentrations ou les durées d'immersion efficaces pour les études avec des concentrations élevées, avec certains résultats contradictoires sur les concentrations et les durées d'immersion les plus létales pour *D. vexillum* (Denny 2008; McCann *et al.* 2013; Roche *et al.* 2015). L'efficacité d'un jet d'hypochlorite de sodium a également été peu étudiée, une seule étude signalant qu'une période d'exposition à l'air est nécessaire après le traitement par jet pour assurer l'efficacité sur des durées semblables contre certains tuniciers, alors que le même traitement n'était pas efficace contre d'autres espèces de tuniciers (Piola *et al.* 2009). Bien que nous n'ayons trouvé dans la littérature aucun protocole de décontamination recommandant l'hypochlorite de sodium pour les EAE marines, une immersion dans de l'hypochlorite de sodium à 0,05 % pendant 6 heures peut être efficace pour tuer les tuniciers solitaires et coloniaux (incertitude raisonnable), ainsi que les moules bleues (incertitude élevée), présents sur l'équipement. Toutefois, d'autres recherches sur d'autres taxons d'EAE (par exemple, crabe vert, *Codium fragile*, macroalgues) sont nécessaires pour mieux comprendre l'efficacité globale de l'hypochlorite de sodium.

Alors que ce n'est pas le cas pour les EAE d'eau douce, l'acide acétique (immersion/jet avec ou sans exposition à l'air) est l'un des traitements les plus étudiés dans la littérature pour les EAE marines. On a démontré qu'il est très efficace pour contrôler un grand nombre d'espèces de salissures cosmopolites, y compris les tuniciers solitaires et coloniaux, la moule bleue et quelques macroalgues (Carver *et al.* 2003; Coutts and Forrest 2005; MacNair *et al.* 2006; Forrest *et al.* 2007; Gill *et al.* 2007; Denny 2008; MacNair 2009; Piola *et al.* 2009; Rolheiser

et al. 2012; Sievers *et al.* 2019). D'après des études qui ont montré une mortalité de 100 %, une immersion dans de l'acide acétique à 5 % pendant 10 minutes est une bonne option pour traiter l'équipement encrassé par des tuniciers, des macroalgues et des moules bleues juvéniles (incertitude raisonnable à élevée). Cependant, aucune donnée n'était disponible pour le crabe vert et le *Codium fragile*. Les jets d'acide acétique étaient moins efficaces et il faut ajouter une étape subséquente de séchage à l'air (exposition à l'air) pour atteindre une mortalité de 100 % (Piola *et al.* 2009). Les immersions dans de l'acide acétique (à 2 et 4 %), suivies d'une exposition à l'air (une heure et 24 heures), étaient également létales pour les tuniciers coloniaux et certains tuniciers solitaires (Forrest *et al.* 2007; Carman *et al.* 2016), et ce traitement combiné a permis de réduire les durées d'immersion. Sievers et ses collaborateurs (2019) ont signalé que la combinaison de traitements à la chaleur et à l'acide était plus efficace contre les tuniciers solitaires qu'un seul des deux traitements. Les études sur la moule bleue qui examinaient l'acide acétique ont été menées principalement pour contrôler les tuniciers (ou d'autres EAE) dans les stocks de moules d'élevage afin de réduire leur propagation pendant les activités d'aquaculture (par exemple, transferts). De ce fait, les concentrations et les durées d'exposition testées sont généralement faibles, car elles ont été explicitement choisies pour être tolérées par les moules. Cependant, des concentrations plus élevées et des durées d'exposition plus longues peuvent également être efficaces pour tuer les mollusques. Bien qu'il n'existe pas de données montrant si *M. edulis* réagira de la même façon, un traitement à l'acide acétique à 4 % (2 minutes et 24 heures d'exposition à l'air) a causé une mortalité importante chez la moule verte (*Perna canaliculus*) [Denny 2008]. On peut en déduire que l'acide acétique pourrait être un traitement prometteur pour les moules bleues adultes, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour établir les durées d'immersion les plus efficaces (avec séchage à l'air ou non). En ce qui concerne l'efficacité de l'acide acétique sur les bioalissures en général, Cahill et ses collaborateurs (2021) ont montré que les immersions dans de l'acide acétique à 4 % pendant 30 secondes étaient très efficaces pour éliminer totalement la pellicule de bioalissures (principalement les bryozoaires et les vers polychètes). Il existe également des preuves que l'acide acétique peut réduire la couverture par le tunicier *Eudistoma elongatum*, une ascidie envahissante en Nouvelle-Zélande, à près de zéro (Page *et al.* 2011) et causer un taux de mortalité élevé chez *Caprella* spp. (Paetzold *et al.* 2008). Deux protocoles (le personnel du MPO pour les opérations sur le terrain et le groupe responsable des EAE au sein de la Direction des sciences du MPO à Terre-Neuve-et-Labrador) recommandent l'immersion dans de l'acide acétique à 5 % pour prévenir la propagation des EAE marines, mais ne fournissent pas d'information sur la durée d'exposition.

Bien que quelque peu variable entre les espèces de tuniciers, une efficacité de 100 % a été signalée dans presque toutes les études utilisant un traitement combiné par immersion dans la saumure (70 ou 300 ppm) et séchage à l'air (exposition à l'air) [MacNair *et al.* 2006; Carman *et al.* 2010, 2016]. Cependant, l'immersion dans la saumure à elle seule n'était pas toujours efficace pour contrôler les infestations de tuniciers (McCann *et al.* 2013; Rolheiser *et al.* 2012). MacNair et ses collaborateurs (2006) ont noté que les traitements par immersion dans la saumure, même à des concentrations élevées (300 ppm), n'étaient efficaces pour réduire la couverture de tuniciers sur les engins d'aquaculture et les boudins de moules que lorsqu'ils étaient suivis d'une période d'exposition à l'air. Les traitements par immersion dans une solution de saumure (300 et 70 ppm, avec et sans période de séchage à l'air) étaient complètement inefficaces (0 %) sur les moules adultes et juvéniles ou entraînaient une mortalité très faible (MacNair *et al.* 2006; Sharp *et al.* 2006; Bourque et Myrand 2007; Carman *et al.* 2016; Landry *et al.* MPO, données non publiées). Cependant, pour ce qui est de l'acide acétique, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour en déterminer l'efficacité sur la survie des moules lorsqu'il est utilisé à des concentrations plus élevées ou pendant des durées d'immersion plus longues. L'élimination des macroalgues en combinant une immersion dans la

saumure et un séchage à l'air requiert des concentrations plus élevées (300 à 400 ppm, comme dans MacNair 2002 et Mineur *et al.* 2007) et d'autres recherches sont nécessaires pour évaluer la survie des macroalgues dans une gamme de concentrations et de durées d'exposition. L'ensemble de la littérature indiquait qu'une immersion dans la saumure (300 ppm) pendant 15 minutes suivie d'une période d'exposition à l'air de 2 heures peut être efficace pour tuer les tuniciers solitaires et coloniaux et les macroalgues (incertitude raisonnable) et le *Codium fragile* (incertitude élevée) présents sur l'équipement (par exemple, engins de pêche). Cependant, ce traitement n'était pas efficace contre la moule bleue et nous n'avons trouvé aucune donnée sur le crabe vert.

Les secteurs de la mytiliculture et de l'ostréiculture utilisent couramment la chaux hydratée pour contrôler les prédateurs (par exemple, les étoiles de mer) et les tuniciers encrassants sur les collecteurs de naissains de moules, les boudins de moules et les engins d'aquaculture, comme les bouées (Ramsay *et al.* 2014). À elle seule, la chaux hydratée (4 %) n'était pas une méthode de lutte efficace à 100 % pour toutes les espèces ciblées (MacNair 2002; Carver *et al.* 2003; Denny 2008; MacNair *et al.* 2006; Locke *et al.* 2009; Switzer *et al.* 2011; Rolheiser *et al.* 2012; Ramsay *et al.* 2014), mais l'exposition à l'air après le traitement améliore l'efficacité de cette technique pour les tuniciers (MacNair *et al.* 2006; Gill *et al.* 2007) et le *Codium fragile* (MacNair 2002). Le Comité des introductions et des transferts du MPO à l'Île-du-Prince-Édouard recommande une immersion dans une solution de saumure (300 ppm) et de chaux à 4 % pendant 30 secondes, suivie d'un séchage à l'air d'une heure pour tuer les tuniciers sur les stocks et les engins d'aquaculture. Nous n'avons trouvé aucune étude scientifique combinant les deux produits chimiques dans la littérature, mais comme des études distinctes ont montré que les immersions dans la saumure et de la chaux hydratée à des concentrations semblables, suivies d'une exposition à l'air, étaient efficaces contre les tuniciers et les macroalgues (MacNair 2002; Mineur 2007; MacNair *et al.* 2006; Gill *et al.* 2007; Carman *et al.* 2010, 2016), nous pouvons supposer que leur combinaison serait tout aussi efficace. En résumé, pour un traitement de décontamination appliqué à toutes les espèces, une immersion dans de la chaux hydratée (4 %) pendant 15 minutes suivie d'une période de séchage de 2 heures à l'air pourrait être efficace pour tuer les tuniciers coloniaux (incertitude raisonnable), ainsi que les tuniciers solitaires et le *Codium fragile* (incertitude élevée) présents sur les équipements encrassés. Toutefois, ce traitement n'était pas efficace contre les moules bleues et les crabes verts adultes, et nous n'avons trouvé aucune donnée sur les crabes verts juvéniles et les macroalgues.

En général, les protocoles examinés ne contiennent pas suffisamment de renseignements pour permettre de déterminer s'ils sont étayés par la littérature scientifique. De ce fait, il est clairement nécessaire d'élaborer des protocoles LVS+D plus détaillés pour les eaux marines.

4.3. LIMITES ET SOURCES D'INCERTITUDE

Ce document de recherche a relevé de multiples limites et sources d'incertitude, ce qui a compliqué l'élaboration de lignes directrices communes pour les écosystèmes marins et d'eau douce. Du fait de l'approche monospécifique (ou visant des taxons semblables) de nombreuses études, il était difficile de comparer les études (résultats contradictoires ou contre-intuitifs probablement dus à des différences non signalées dans le plan expérimental). Par conséquent, aucun traitement de décontamination unique ne s'est révélé applicable à toutes les EAE d'eau douce et marines, car bien que plusieurs traitements se soient avérés efficaces pour en tuer certaines, ils étaient fondamentalement propres à une espèce ou à un environnement, avec de grandes plages de mortalité associée. L'efficacité était fonction du type d'embarcation ou d'équipement, du type de traitement, de la durée, de l'intensité et de la méthode précise d'application, ainsi que de l'espèce, entre autres facteurs. Ainsi, les traitements appliqués à ces

facteurs imposeront des niveaux variables de mortalité et de contrôle subséquent des introductions d'EAE.

La majorité des études publiées utilisaient différents plans expérimentaux et différentes échelles et méthodes de mesure de la mortalité ou de l'élimination, ce qui contribue à l'importante incertitude entourant l'évaluation et la comparaison de l'efficacité (définie ici comme l'élimination ou la mortalité). Le séchage à l'air, par exemple, est un traitement de décontamination bien documenté pour lutter contre les EAE, mais son efficacité dépend fortement de la taille des animaux (Ricciardi *et al.* 1995), de la température de l'air et de l'humidité relative (Ricciardi *et al.* 1995; Mohit *et al.* 2021). Ce lien est souvent négligé dans les ouvrages primaires, les études faisant état de l'efficacité du séchage sur une classe de taille des EAE ou une combinaison température/humidité, ce qui fausse les interprétations pour une utilisation future en gestion. Ce problème est aggravé par le fait qu'une grande partie des travaux scientifiques sur la décontamination disponibles dans la littérature primaire ont été réalisés dans des conditions de laboratoire (voir les tableaux 3 à 7) et que les résultats ne se traduisent pas nécessairement par des applications pratiques tout aussi efficaces dans la « réalité ». Le séchage de fragments de macrophytes dans un laboratoire, par exemple, ne représente pas le même environnement que celui de fragments de macrophytes dans des espaces de bateau humides. D'autres recherches sont nécessaires pour comprendre comment les traitements de décontamination testés en laboratoire (par exemple, séchage à l'air, application de vapeur, congélation) peuvent être utilisés efficacement sur le terrain.

De plus, un sous-ensemble important des études scientifiques que nous avons prises en compte dans nos travaux a été conçu pour répondre à des questions pour différentes applications (par exemple, transferts aquacoles, nettoyage d'infrastructures). Dans l'eau douce, la décontamination était axée sur le nettoyage des embarcations de plaisance et de l'équipement en transit, tandis que dans l'eau de mer, les traitements de décontamination visaient principalement le nettoyage des boudins de moules ou de l'équipement et des infrastructures déployés à plus long terme (par exemple, quais flottants), qui peuvent être plus fortement encrassés. L'interprétation de l'élimination et de la mortalité à partir de ces données donne lieu à une certaine incertitude quant à l'efficacité de ces techniques dans le contexte des étapes du LVS + D. De plus, à notre connaissance, la majorité des protocoles LVS+D ciblent les activités récréatives en eau douce, sans protocole directement lié à des activités semblables de navigation de plaisance en mer.

Une certaine incertitude entoure également les techniques de lavage sous pression – un traitement de décontamination largement recommandé dans les protocoles LVS+D provinciaux et étatiques (par exemple, « UMPS IV », Elwell et Phillips 2021). En raison du nombre limité d'études scientifiques, des recherches supplémentaires sur les applications sur le terrain sont nécessaires pour déterminer les pressions qui sont les plus efficaces pour éliminer les EAE marines et d'eau douce, les températures qui provoquent la mortalité de la moule zébrée et des autres EAE ciblées et les temps de contact nécessaires pour que les combinaisons de pression et de température soient efficaces à 100 %. De longs temps de contact et des températures élevées, par exemple, sont difficiles à appliquer sur le terrain. De plus, nous avons rarement trouvé dans les ouvrages primaires des détails sur la configuration recommandée de la tête de buse, comme le type de jet (par exemple, en éventail plutôt qu'étroit) et l'angle (par exemple, 40 °C), ainsi que le débit (par exemple, cinq gallons par minute) et la distance d'application, qui peuvent influencer l'efficacité des traitements à l'eau sous pression. Bien que certains protocoles relatifs à l'eau douce donnent ce type de conseils (voir les détails dans les manuels de formation en inspection et décontamination des embarcations de Brown et Walters 2021; Government of British Columbia 2020a), des renseignements semblables ne figuraient pas dans les protocoles pour le milieu marin. Davantage de recherches primaires sur les approches

d'application du lavage sous pression (par exemple, buse, angle, gallons par minute) sont nécessaires pour assurer l'efficacité maximale de l'application.

Les combinaisons de traitements peuvent également être plus efficaces que les approches utilisant des traitements uniques pour de nombreuses espèces, bien que la recherche à ce sujet est nettement insuffisante. L'inclusion d'une étape de séchage à l'air après les techniques d'immersion dans de la chaux hydratée (Ramsay *et al.* 2014; MacNair *et al.* 2006) et le lavage sous pression (Coutts 2006; Coutts et Forrest 2007) se sont révélées plus létales pour les tuniciers que seulement l'une ou l'autre des applications; et d'après les constatations de Mohit (2021), l'immersion dans de l'eau chaude suivie d'un séchage à l'air était également plus efficace que l'immersion seule pour tuer les invertébrés et les macrophytes. Selon des données supplémentaires, la combinaison d'applications de chaleur et de produits chimiques peut également accroître l'efficacité du traitement, les immersions dans des solutions plus chaudes d'acide acétique nécessitant moins de temps pour tuer les tuniciers solitaires (Sievers *et al.* 2019). Les lacunes actuelles dans les connaissances sur les combinaisons de traitements ne permettent pas de la prendre en compte dans le présent document de recherche, mais les recherches futures devraient examiner les effets cumulatifs des traitements de décontamination sur les EAE, car ils pourraient façonner les recommandations futures en matière de LVS+D.

L'acclimatation environnementale peut également avoir une incidence importante sur les chances de survie d'un organisme pendant un traitement de décontamination. Les espèces acclimatées à des températures ou des salinités plus élevées (ou plus faibles), par exemple, tolèrent souvent mieux les immersions dans l'eau chaude (ou la congélation), la dessiccation ou les changements du stress osmotique (par exemple, les moules : Gonzalez et Yevich 1976; McMahon et Ussery 1995; Elderkin et Klerks 2005; Rajagopal *et al.* 2005; Ellis et Maclsaac 2009; la nasse de Nouvelle-Zélande et la petite corbeille d'Asie : Matthews et McMahon 1999; les mollusques : Wada et Matsukura 2011; Peck *et al.* 2014; le crabe vert : Muñoz *et al.* 2017; les macroalgues : Atkinson *et al.* 2020; les puces d'eau et la crevette rouge sang : Ellis et Maclsaac 2009). Ainsi, les tendances saisonnières à plus long terme de la température de l'eau et de la salinité du plan d'eau d'où provient une population donnée peuvent avoir des répercussions supplémentaires sur l'efficacité d'un traitement de décontamination pour de nombreuses EAE.

Certaines espèces (par exemple, les huîtres et les balanes) n'ont pas été prises en compte dans cet examen, et les traitements ou les espèces considérés n'étaient pas tous bien représentés dans la littérature primaire. Très peu de données étaient disponibles pour la plupart des stades de juvénile. Les espèces ayant des antécédents d'invasion plus anciens étaient mieux étudiées et très peu d'information était disponible dans l'ensemble pour les macrophytes et les macroalgues dans le contexte de la décontamination. Certains traitements ont été très bien étudiés (par exemple, immersion dans de l'eau chaude, séchage à l'air, hypochlorite de sodium pour les EAE d'eau douce; eau douce et acide acétique pour les EAE marines), mais d'autres très peu (par exemple, jet d'eau chaude à haute pression et acide acétique pour les EAE d'eau douce; jet d'eau chaude à haute pression, Virkon^{MD} et CAQ pour les EAE marines) et les données sur les stratégies de contrôle pour certains groupes d'EAE, comme les macrophytes, les macroalgues et le crabe vert, étaient extrêmement pauvres. À l'avenir, on pourrait étudier d'autres groupes taxonomiques qui pourraient nécessiter différentes techniques de traitement, et il faudra actualiser les avis scientifiques fondés sur ce document de recherche en conséquence.

4.4. COMPATIBILITÉ ET FAISABILITÉ

Bien que les ouvrages primaires aient permis de cerner un grand nombre d'options de traitement efficaces pour la décontamination et le contrôle de diverses EAE marines et d'eau

douce, un certain nombre de considérations peuvent limiter leur utilité dans des contextes réels. Pour recommander de futurs protocoles, les gestionnaires devront évaluer ce qui est faisable sur le terrain, avec l'équipement et les outils disponibles. Il s'agit notamment de la facilité d'application et de l'aspect pratique (par exemple, pour les embarcations ou l'équipement), de la compatibilité avec de nombreux matériaux, des dommages potentiels aux embarcations ou à l'équipement, des risques connexes pour la santé et la sécurité, des coûts et de l'élimination. Il faudra donc tenir compte de la compatibilité (tableau 13) et de la faisabilité (tableau 14) pour appliquer un traitement.

Les jets d'eau chaude et les immersions dans de l'eau chaude sont des méthodes de décontamination efficaces, peu coûteuses et écologiques (par exemple, Schisler *et al.* 2008; Morse 2009; Shannon *et al.* 2018) qui peuvent éliminer ou tuer plusieurs taxons d'EAE marines et d'eau douce. Cependant, l'élimination peut être rendue difficile par le type et la complexité de l'embarcation (par exemple, lorsqu'il n'est pas possible d'inspecter visuellement certains compartiments internes) et son efficacité peut être difficile à évaluer lorsque les organismes encrassants sont petits. Les jets d'eau chaude sont habituellement recommandés pour les embarcations (Elwell et Phillips 2021), tandis que les immersions dans de l'eau chaude sont efficaces pour tuer les EAE sur l'équipement (par exemple, Shannon *et al.* 2018). Avec l'arrivée de la technologie des cuves d'immersion, les immersions dans de l'eau chaude pourraient éventuellement devenir possibles pour les embarcations, mais il reste encore beaucoup de travail à faire pour évaluer leur faisabilité sur le terrain. L'examen de la littérature scientifique suggère qu'il faudrait peut-être augmenter les températures d'immersion ou de jet d'eau chaude et les durées d'exposition pour être en mesure de tuer le plus grand nombre possible d'EAE ciblées. Toutefois, ces changements doivent faire l'objet d'essais supplémentaires afin que l'on puisse évaluer la viabilité de leur mise en œuvre sur le terrain ainsi que le risque d'endommager des matériaux sensibles ou les compartiments internes des embarcations et de l'équipement. Divers matériaux peuvent être endommagés par les jets d'eau chaude et les immersions dans de l'eau chaude (aluminium, plastique, Gore-Tex, peintures, PEHD, acrylique : Miller *et al.* 2006; Brown et Walters 2021) et des températures supérieures à 50 °C peuvent endommager les pompes, les moteurs et les systèmes de refroidissement (Elwell et Phillips 2021). Certains types de buses peuvent également endommager les embarcations et l'équipement (Brown et Walters 2021). En dehors des stations d'inspection et de décontamination professionnelles des embarcations, le grand public pourrait avoir du mal à obtenir les températures élevées de l'eau nécessaires pour tuer la plupart des EAE (49 ou 60 °C) pour un certain nombre de raisons. Premièrement, très peu de résidences ou de marinas ont des robinets extérieurs d'eau chaude. Deuxièmement, les températures requises peuvent être difficiles à atteindre et à maintenir pendant les temps de contact requis, car le Code national de la plomberie du Canada (NRCC 2015) exige que les chauffe-eaux résidentiels soient réglés à 60 °C, mais les températures au point de contact seront plus basses (environ 49 °C) en raison de la perte de chaleur de l'eau dans les tuyaux, les boyaux, de la température ambiante, etc. (Lévesque *et al.* 2004). Troisièmement, une quantité suffisante d'eau douce n'est pas toujours facilement accessible dans certaines résidences ou marinas. De plus, la mauvaise application des traitements de décontamination à l'eau chaude pourrait causer des brûlures (DiVittorio *et al.* 2012; Anderson *et al.* 2015).

Les jets sous pression sont une méthode de décontamination écologique et peu coûteuse. Le rinçage à basse pression (par exemple, tuyau d'arrosage, moins de 60 lb/po²) convient aux vêtements de flottaison individuels, aux ancres, aux citernes de ballast et aux compartiments intérieurs (Elwell et Phillips 2021; Morse 2009; Adirondack Park Invasive Plant Program 2014), tandis que le rinçage à haute pression (par exemple, plus de 1 000 lb/po²) peut être appliqué aux coques de bateaux, aux remorques et aux surfaces extérieures (non poreuses) de l'équipement plus gros (ANSTF 2013; Elwell et Phillips 2021), mais peut endommager

l'équipement délicat, le néoprène, les pontons, le Gore-Tex, les surfaces peintes, les joints collés et les objets pneumatiques (Wong *et al.* 2014; Elwell et Phillips 2021). Il faut donc tenir compte de la compatibilité avec l'équipement/la partie de l'embarcation en question avant d'appliquer un jet sous pression (voir le tableau 13). Le lavage à l'eau chaude sous pression ou l'application de vapeur sont les plus efficaces pour tuer les EAE (Minnesota Department of Natural Resources 2013; Crane *et al.* 2019; Wisconsin Department of Natural Resources 2020) mais, dans de nombreux cas, peuvent nécessiter de l'équipement spécialisé (tuyaux, raccordements d'eau, nettoyeurs à pression, raccordements électriques) qui n'est pas toujours facilement accessible. De plus, ces approches sont non seulement exigeantes en main-d'œuvre, mais aussi gourmandes en eau (Miller *et al.* 2006; Brown et Walters 2021). De plus, étant donné que les longs temps de contact et les températures requises sont souvent difficiles à atteindre sur le terrain et que le succès de la décontamination peut dépendre de la capacité de diriger la pression prévue dans les espaces cachés, les applications sur le terrain peuvent être moins efficaces que d'autres traitements. Bien que suggérée dans certains programmes LVS, l'utilisation d'installations de lavage des voitures pour la décontamination n'est pas recommandée, car la température et la pression de l'eau, généralement de 37 °C et 1 500 lb/po² au maximum, peuvent être inadéquates pour tuer efficacement les EAE, mais surtout parce que les organismes survivants peuvent se propager à un plan d'eau en empruntant les infrastructures municipales et les égouts pluviaux.

Le séchage à l'air est une méthode de décontamination simple, peu coûteuse et écologique (Coutts 2006; Alonso *et al.* 2016; Hillock et Costello 2013) et tue plusieurs taxons d'EAE marines et d'eau douce, bien que les durées d'exposition efficaces soient longues. Cette approche est efficace pour les petits et les grands types d'équipement (embarcations, mouillages, équipement d'aquaculture, etc.). Le séchage à l'air n'élimine pas les organismes, mais constitue un outil de décontamination plus efficace lorsqu'il est combiné à d'autres approches (par exemple, jet d'eau chaude ou sous pression). La littérature scientifique indique qu'une durée de sept jours est la meilleure option pour tuer le plus grand nombre d'EAE ciblées. Cependant, les gestionnaires devront tenir compte du fait que de nombreux plaisanciers pratiquent leurs loisirs en fin de semaine et qu'une durée de séchage plus courte, bien que moins efficace, pourrait mieux s'intégrer dans la semaine de travail et entraîner une meilleure participation du public.

La congélation est une méthode de décontamination peu coûteuse et écologique pour les petits équipements et s'est révélée efficace pour tuer les moules de la famille des dreissenidés (McMahon *et al.* 1993; Payne *et al.* 1992), la nasse de Nouvelle-Zélande (Cheng et LeClair 2011), certaines espèces de zooplancton pélagique (Branstrator *et al.* 2013; De Stasio *et al.* 2019) et *M. cerebralis* (Wagner 2002; Wagner *et al.* 2003; Hedrick *et al.* 2008). Cependant, les durées d'exposition peuvent être longues (quatre jours dans certains cas) et cette méthode est peu pratique pour décontaminer des embarcations et de l'équipement de plus grande taille, sauf en hiver si les températures tombent en dessous de 0 °C.

La majorité des méthodes de décontamination chimique efficaces identifiées pour le contrôle des EAE marines et d'eau douce nécessitent une immersion qui, si elle est possible pour les petits équipements, n'est pas envisageable pour les embarcations, les remorques et l'équipement de plus grande taille (Davis *et al.* 2018). Les coûts sont généralement plus élevés que ceux des autres traitements et il faut être en mesure de gérer des concentrations précises (par exemple, Piola *et al.* 2009; Elwell et Phillips 2021). Ces méthodes posent de multiples dangers pour la santé humaine, allant de l'inhalation et des brûlures, à l'ingestion accidentelle et à l'irritation cutanée. Les effets des traitements chimiques sur l'intégrité de l'équipement sont également préoccupants, car les applications d'eau de Javel, de sel ou de CAQ corrodent souvent le caoutchouc, les tissus, les métaux et les plastiques (par exemple, Hosea et

Finlayson 2005; Schisler *et al.* 2008; Elwell 2010; Stockton et Moffitt 2013; Joyce *et al.* 2019). De nombreux désinfectants chimiques peuvent également avoir de graves impacts sur les eaux locales (MacNair *et al.* 2006; Miller *et al.* 2006; Locke *et al.* 2009). Les produits d'ammonium quaternaire, par exemple, peuvent persister dans les systèmes municipaux d'alimentation en eau potable (Boethling 1984; Zhang *et al.* 2015) et leur utilisation répandue peut avoir des répercussions sur les systèmes aquatiques et pédologiques (Garcia *et al.* 2001; Li et Brownawell 2010; Sarkar *et al.* 2010), avec potentiellement des effets génotoxiques (Ferk *et al.* 2007) ou autres sur des organismes non ciblés (Waller *et al.* 1993); l'eau de Javel peut aussi être dangereuse pour la santé humaine et celle de l'écosystème (Miller *et al.* 2006; Utah Department of Natural Resources 2012; Brown et Walters 2021). De plus, l'élimination chimique de bon nombre des traitements identifiés (Virkon^{MD}, eau de Javel, CAQ, chaux hydratée) n'est pas simple et une élimination inadéquate peut causer des dommages à l'écosystème à long terme (Sebire *et al.* 2018; Bradbeer *et al.* 2020). Il faudra également aborder à l'avenir les questions juridiques concernant l'utilisation de désinfectants à large spectre comme agents de biosécurité pour les EAE (par exemple, herbicide ou insecticide; Cuthbert *et al.* 2018, 2019; Sebire *et al.* 2018). L'utilisation de traitements chimiques devrait se limiter aux situations où les lignes directrices ne peuvent être suivies que partiellement ou sont peu pratiques (par exemple, lorsque le temps de séchage est limité et que des EAE connues sont présentes); ces traitements doivent de préférence être appliqués par du personnel qualifié. Si des traitements chimiques sont inévitables, il faut choisir l'option la plus écologique pour les espèces préoccupantes (par exemple, immersion dans de l'eau salée pour tuer les moules de la famille des dreissenidés ou immersion dans de l'acide acétique pour tuer les tuniciers) et prendre soin de porter des vêtements de protection appropriés.

4.5. IMPORTANCE DES PROGRAMMES LVS, D'INSPECTION DES EMBARCATIONS ET DE DÉCONTAMINATION

De récents examens scientifiques ont confirmé les risques importants que pose la navigation de plaisance comme voie de propagation secondaire des EAE dans les écosystèmes d'eau douce et marins du Canada (Drake 2017; Drake *et al.* 2017; Simard *et al.* 2017). D'après les sondages menés auprès des pêcheurs récréatifs en 2020 en Ontario, bien que plus de 85 % des pêcheurs à la ligne vident toujours leur cale, leurs viviers et leurs moteurs et inspectent visuellement leur bateau pour en retirer les plantes, les organismes et la boue avant son déplacement, ils ne sont que 70 % à bien sécher leur bateau et leurs engins de pêche et moins de 55 % à laver leur bateau à l'eau chaude ou à haute pression (Len Hunt, com. pers.). De plus, plusieurs études indiquent que l'efficacité du nettoyage des bateaux est grandement influencée par le comportement des plaisanciers (Jensen 2010; Rothlisberger *et al.* 2010; Cimino et Strecker 2014; Drake 2017). De ce fait, la mise en œuvre des protocoles LVS et des programmes est essentielle pour prévenir l'introduction et la propagation des EAE. Les campagnes de sensibilisation et d'éducation comme « Lavez, videz et séchez » (LVS) et « Pull the plug » sont facilement accessibles au grand public, essentielles pour prévenir l'introduction et la propagation des EAE et devraient continuer d'être soutenues et mises en œuvre.

L'exécution des étapes de lavage, vidange et séchage lors de travaux dans l'eau ou à proximité de l'eau favorisera probablement l'élimination des organismes d'EAE visibles à l'œil nu (par exemple, crabes adultes, moules zébrées, végétation aquatique) des embarcations et de l'équipement, mais les organismes plus petits (y compris les stades larvaires) peuvent être plus difficiles à voir et plus facilement piégés dans des zones difficiles d'accès. Par conséquent, lorsqu'il y a un risque plus élevé d'EAE fixées sur les embarcations (par exemple, une embarcation quittant un plan d'eau où la moule zébrée est établie), une inspection approfondie du bateau est une première étape essentielle pour déterminer le risque et la nécessité d'une décontamination. Si une étape de décontamination est nécessaire en plus du lavage, vidange et

séchage, elle peut être effectuée soit par le propriétaire ou le conducteur de l'embarcation, soit à des stations d'inspection et de décontamination professionnelles des embarcations. Actuellement, seules quelques provinces appliquent ou recommandent des traitements de décontamination en plus des étapes de lavage, vidange et séchage. Les provinces de l'Ouest (Alberta, Colombie-Britannique, Manitoba et Saskatchewan) ont axé leurs protocoles de décontamination sur les protocoles et normes décrites dans le document « Uniform Minimum Protocols and Standards for Inspection and Decontamination Programs for Dreissenid Mussels in the Western United States » (UMPS IV, Elwell et Phillips 2021), qui sont appliqués à leurs stations d'inspection et de décontamination des embarcations.

Ces stations d'inspection et de décontamination des embarcations, qui emploient du personnel qualifié, semblent efficaces pour réduire la propagation des EAE. Par exemple, le gouvernement de la Saskatchewan a signalé qu'aucune moule envahissante n'avait été détectée dans la province en 2020 (Government of Saskatchewan 2021). En Colombie-Britannique, les agents de conservation auxiliaires ont effectué 29 900 inspections en 2020 et ont arrêté 16 bateaux encrassés par des moules. De même, en 2019, 22 bateaux encrassés par des moules ont été interceptés et décontaminés. Ils provenaient de l'Ontario, du Michigan, de l'Utah et de la Caroline du Nord (Government of British Columbia 2021c). Le programme de la Colombie-Britannique avait été notifié à l'avance pour 17 des 22 bateaux encrassés par des moules, soit par une autre administration, soit par des agents des services frontaliers du Canada (Government of British Columbia 2021c).

La mise en œuvre continue des programmes LVS, ainsi que des unités mobiles de décontamination aux principaux points d'entrée et aux plans d'eau contaminés, aidera à prévenir la propagation des EAE dans d'autres plans d'eau. Ainsi, les provinces et les États de l'Ouest ciblent les bateaux qui arrivent sur leur territoire aux principaux points d'entrée le long des routes (Martina Beck, gouvernement de la Colombie-Britannique, comm. pers.). Il peut également être important d'optimiser l'emplacement des futures stations d'inspection ou de nettoyage des embarcations. Par exemple, Drury et Rothlisberger (2008) et Rothlisberger et Lodge (2011) ont signalé que le nettoyage obligatoire des embarcations à la sortie des lacs infestés (gestion « offensive » des EAE) était le plus efficace pour prévenir la propagation au début du processus d'invasion, mais que la mise en place de stations de nettoyage dans les lacs non envahis pour cibler les arrivées était le plus efficace à mesure que l'invasion progressait (gestion « défensive » des EAE). Haight et ses collaborateurs (2021) ont de même souligné l'importance d'optimiser l'emplacement des stations d'inspection et de décontamination des embarcations.

4.6. AUTRES CONSIDÉRATIONS

Bien que cela dépasse la portée du présent document de recherche, plusieurs considérations de gestion doivent être évaluées. Les étapes du LVS + D ne sont pas mutuellement exclusives; la décontamination est une étape supplémentaire qui peut être exigée par les gestionnaires. La façon dont les étapes du LVS + D seront mises en œuvre dépendra des priorités de gestion, qui devront tenir compte des endroits (par exemple, plans d'eau) ou des événements (par exemple, tournois de pêche) qui présentent un risque élevé, de l'endroit où les protocoles LVS+D devraient être effectués et par qui (à l'entrée ou à la sortie d'un plan d'eau, aux frontières provinciales, etc.), des espèces ciblées et de la faisabilité d'options de traitement efficaces aux stations d'inspection et de décontamination des embarcations ou par le grand public. En outre, l'adoption par le public et le promoteur et leur participation sortent du cadre de ce travail, mais elles joueront un rôle essentiel dans le succès de la gestion des EAE dans les écosystèmes marins et d'eau douce.

Une autre considération est que la décontamination pourrait mener à 1) l'élimination sans mortalité des EAE, 2) la mortalité sans élimination des EAE ou 3) l'élimination et la mortalité des EAE (le résultat préférable). Si les EAE sont éliminées, mais pas tuées, elles peuvent être entraînées par le lavage et se propager dans les cours d'eau. À l'inverse, si les EAE sont tuées sans être éliminées (par exemple, organismes incrustés), des questions peuvent subsister quant à leur viabilité. Ces différents résultats pourraient donc avoir des conséquences importantes sur l'application de la réglementation sur les EAE dans certaines provinces et certains territoires.

Il faudra revoir et ajuster les traitements de décontamination mis en œuvre à mesure que de nouvelles données scientifiques seront disponibles ou que de nouvelles EAE s'établiront.

5. CONCLUSIONS

- Les campagnes de sensibilisation et d'éducation comme « Lavez, videz et séchez » (LVS) et « Pull the plug » sont facilement accessibles au grand public, importantes pour aider à prévenir l'introduction et la propagation des EAE et devraient continuer d'être soutenues et mises en œuvre.
- Les protocoles LVS+D peuvent permettre de réduire la pression de propagule en éliminant physiquement (par exemple, lavage, frottement, prélèvement à la main) ou en tuant les EAE (par exemple, lavage sous pression, traitement thermique ou chimique). La plupart des documents existants portaient sur la mortalité comme mesure de l'efficacité.
- Les protocoles LVS+D appliqués actuellement par les gouvernements et les États sont généralement appuyés par la littérature scientifique, bien qu'ils soient souvent axés sur le contrôle d'une espèce en particulier. Il faudrait revoir régulièrement les protocoles afin d'évaluer les résultats présentés dans la littérature scientifique récente et leur efficacité/faisabilité potentielle dans les applications sur le terrain.
- La plupart des protocoles LVS+D visaient les EAE d'eau douce, et la littérature ne contenait pas de protocoles complets et détaillés pour les EAE marines ou ils avaient été principalement élaborés pour différentes applications et doivent être approfondis pour que l'on puisse les mettre en œuvre.
- Les étapes du LVS et de décontamination ne sont pas mutuellement exclusives; la décontamination est une étape supplémentaire qui peut être exigée par les gestionnaires. Cette décision devra tenir compte des endroits à risque élevé, des endroits où les étapes du LVS + D doivent être effectuées (à l'entrée ou à la sortie d'un plan d'eau, aux frontières provinciales, etc.), des espèces ciblées et de la faisabilité d'une application efficace du traitement.
- De nombreux traitements de décontamination propres à l'espèce ou à l'environnement (marin ou eau douce) ont été jugés efficaces (99 % ou plus) pour tuer ou éliminer les EAE.
- Aucun traitement de décontamination ne peut être appliqué à toutes les EAE marines et d'eau douce ou à toutes les embarcations et tous les équipements.
- Les traitements de décontamination chimiques devraient être limités aux situations où les autres options de traitement ne sont pas réalisables. Si un traitement chimique est inévitable, il convient de choisir celui qui est le plus écologique pour l'espèce préoccupante et, de préférence, de le faire appliquer par du personnel qualifié.
- Les principales incertitudes et lacunes dans les connaissances sont les suivantes :

-
- comparer des études qui avaient différents modèles expérimentaux, échelles et méthodes de mesure de la mortalité ou de l'élimination;
 - extrapoler les résultats des études en laboratoire aux conditions sur le terrain;
 - interpréter l'efficacité des traitements de décontamination conçus pour différentes applications (par exemple, transferts aquacoles, nettoyage d'infrastructures).
 - Ce document décrit les traitements de décontamination qui sont létaux pour des groupes représentatifs d'EAE en fonction des données scientifiques actuellement disponibles. À mesure qu'il y aura de nouvelles espèces ou des renseignements supplémentaires sur les traitements, il faudra mettre à jour le présent avis scientifique.
 - L'adoption par le public et la conformité de ce dernier sortent de la portée de ce travail, mais elles joueront un rôle essentiel dans le succès de la gestion des EAE dans les écosystèmes marins et d'eau douce.

6. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le comité directeur et les participants à la réunion qui ont fourni des commentaires et des avis utiles : Andrew Drake, Martina Beck, Renée Bernier, Claudio DiBacco, Andrew Drake, Timothy Johnson, Sophie Foster, James Kristmanson, Andrea Locke, Lynn Lush, Cynthia McKenzie, Chris McKindsey, Aaron Ramsay, Stephanie Sardelis, Brendan Spearin et Thomas Therriault. Nous remercions également les personnes-ressources des provinces de nous avoir fourni des renseignements précieux : Jeff Brinsmead, Laureen Janusz, Nicole Kimmel et Rob Mcleod. Le président et le rapporteur, Gilles Olivier et Alex Tuen, respectivement, ont assuré une réunion harmonieuse et efficace. Enfin, nous remercions Martina Beck et Chris McKindsey, qui ont procédé à l'examen final du document.

7. RÉFÉRENCES CITÉES

- Adirondak Park Invasive Plant Program 2014. Boat inspection and decontamination for Aquatic Invasive Species prevention. [Boat inspection and decontamination for Aquatic Invasive Species prevention](#). Accessed October 2020. Recommendations for the Adirondack Region (USA). 64 p.
- Alberta Environment and Parks 2017. [Decontamination protocol for watercraft & equipment](#). ISBN 978-1-4601-3498-6. Accessed October 2020. Alberta Government (Canada). iii + 28 p. + appendices.
- Alonso, A., Valle-Torres, G., and Castro-Diez, P. 2016. [Survival of an invasive aquatic snail to overland translocation in non-aquatic media: Implications for spreading](#). *Limnologica* 57: 60-65.
- Anderson, L.G., Dunn, A.M., Rosewarne, P.J., and Stebbing, P.D. 2015. [Invaders in hot water: a simple decontamination method to prevent the accidental spread of aquatic invasive non-native species](#). *Biol. Invasions* 17: 2287-2297.
- ANSTF (Aquatic Nuisance Species Task Force) 2013. [Voluntary guidelines to prevent the introduction and spread of aquatic invasive species: recreational activities](#). Accessed November 2020. Stop aquatic hitchhikers! (USA). 16 p.
- Aquatic Invasive Species Network 2021. Level II inspector and decontamination training (WIT II). Accessed online February 2021. WIT/WID Western States Training Program, Pacific States Marine Fisheries Commission, Nevada/Arizona (USA).
- Arens, C.J., Paetzold, S.C., Ramsay, A., and Davidson, J. 2011. [Pressurized seawater as an antifouling treatment against the colonial tunicates *Botrylloides violaceus* and *Botryllus schlosseri* in mussel aquaculture](#). *Aquat. Invasions* 6(4): 465-476.
- Atkinson, J., King, N., Wilmes, S.-B., Moore, P. 2020. [Summer and winter marine heatwaves favor an invasive over native seaweeds](#). *J. Phycol.* 56: 1591-1600.
- Bailey, S.A. 2015. [An overview of thirty years of research on ballast water as a vector for aquatic invasive species to freshwater and marine environments](#). *Aquat. Ecosyst. Health* 18(3): 261-268.
- Banha, F., Gimeno, I., Lanao, M., Touya, V., Durán, C., Peribáñez, M., and Anastácio, P. 2016. [The role of waterfowl and fishing gear on zebra mussel larvae dispersal](#). *Biol. Invasions* 18: 115-125.
- Baniszewski, J., Cuda, J. P., Gezan, S. A., Sharma, S., and Weeks, E. N. I. 2016. Stem fragment regrowth of *Hydrilla verticillata* following desiccation. *J. Aquat. Plant Manag.* 54: 53-60.
- Barbour, J. H., Dick, J. T. A., Alexander, M. E., and Caffrey, J. 2013. Biosecurity measures to reduce secondary spread of the invasive freshwater Asian clam, *Corbicula fluminea* (Müller, 1774), *Manag. Biol. Invasions* 4(3): 219-230.
- Barnes, M.A., Jerde, C.L., Keller, D., Chadderton, W.L., Howeth, J.G., and Lodge, D.M. 2013. [Viability of aquatic plant fragments following desiccation](#). *Invasive Plant Sci. Manag.* 6: 320-325.
- Basiouny, F. M., Haller, W. T., and Garrard L. A. 1978. [Survival of hydrilla \(*Hydrilla verticillata*\) plants and propagules after removal from the aquatic habitat](#). *Weed Sci.* 26(5): 502-504.
- Beaury, E. M., Finn, J. T., Corbin, J. D., Barr, V., and Bradley, B. A. 2020. [Biotic resistance to invasion is ubiquitous across ecosystems of the United States](#). *Ecol. Lett.* 23: 476-482.

-
- Bellard, C., Thuiller, W., Leroy, B., Genovesi, P., Bakkenes, M., and Courchamp, F. 2013. [Will climate change promote future invasions?](#) *Glob. Chang. Biol.* 19: 3740– 3748.
- Bernhard, H.F.M. 1986. Asiatic clams tested at Edison stations. *Edison Elec. Biocurr.* 2: 12.
- Best K., McKenzie C. H., and Couturier, C. 2014. [Investigating mitigation of juveniles European green crab *Carcinus maenas* for mussels to prevent transfer during Newfoundland mussel aquaculture operations.](#) *Manag. Biol. Invas.* 5(3): 255-262.
- Beyer, J., Moy, P., and Stasio, B.D. 2011. [Acute upper thermal limits of three aquatic invasive invertebrates: hot water treatment to prevent upstream transport of invasive species.](#) *Environ. Manag.* 47: 67–76.
- Bickel, T.O. 2015. [A boat hitchhiker's guide to survival: *Cabomba caroliniana* desiccation resistance and survival ability.](#) *Hydrobiologia* 746:123–134.
- Blackburn, T.M., Pysek, P., Bacher, S., Carlton, J. T., Duncan, R.P., Jarosik, V., Wilson, J.R.U., Richardson, D.M. 2011. [A proposed unified framework for biological invasions.](#) *Trends Ecol. Evol.* 26: 333–339.
- Blumer, D.L., Newman, R.M., Gleason, F.K. 2009. Can hot water be used to kill Eurasian watermilfoil? *J. Aquat. Plant Manag.* 47: 122–127.
- Boethling, R.S. 1984. [Environmental fate and toxicity in wastewater treatment of quaternary ammonium surfactants.](#) *Water Res.* 18(9): 1061-1076.
- Bourque, F. et Myrand, B. 2007. [Traitement des collecteurs de moule à la saumure pour contrer la prédation par les étoiles de mer.](#) MAPAQ, DIT. Rapport de R-D #160. 20 p.
- Bradbeer, S.J., Coughlan, N.E., Cuthbert, R.N., Crane, K., Dick, J.T.A., Caffrey, J.M., Lucy, F.E., Renals, T., Davis, E., Warren, D.A., Pile, B., Quinn, C., and Dunn, A.M. 2020. . *Sci. Rep.* 10: 1919.
- Bradbeer, S.J., Renals, T., Quinn, C., Warren, D.A., Pile, B., Hills, K., and Dunn, A.M. 2021. [The effectiveness of hot water pressurized spray machines in field conditions to slow the spread of invasive alien species,](#) *Manag. Biol. Invasions* 12(1): 125-147. ISSN 1989-8649.
- Bradley, B.A., Blumenthal, D.M., Wilcove, D.S., Ziska, L.H. 2010. [Predicting plant invasions in an era of global change.](#) *Trends Ecol. Evol.* 25(5): 310-8. PMID: 20097441.
- Branstrator, D.K., Shannon, L.J., Brown, M.E., and Kitson, M.T. 2013. [Effects of chemical and physical conditions on hatching success of *Bythotrephes longimanus* resting eggs.](#) *Limnol. Oceanogr.* 58(6): 2171-2184.
- Brennan, A.C., Woodward, G., Seehausen, O., Muñoz-Fuentes, V. Moritz, C. Guelmami, A., Abbott, R.J., Edelaar P. 2014. Hybridization due to changing species distributions: adding problems or solutions to conservation of biodiversity during global change? *Evol. Ecol. Res.* 16:475-491.
- Britton, D.A., Dingman, S. 2011. [Use of quaternary ammonium to control the spread of aquatic invasive species by wildland fire equipment.](#) *Aquat. Invasions* 6(2): 169-173.
- Brown, E., Walters, R. (Eds.) 2021. [Official Colorado Watercraft Inspection and Decontamination \(WID\) Procedures.](#) Accessed March 2021. Colorado Parks and Wildlife Invasive Species Program 2021, Colorado (USA).
- Bruckerhoff, L., Havel, J., Knight, S. 2015. [Survival of invasive aquatic plants after air exposure and implications for dispersal by recreational boats.](#) *Hydrobiologia* 746: 113–121.
-

-
- Cahill, P.L., Atalah, J., Cunningham, S., Day, A., Fletcher, L., South, P., Forrest, B., Hopkins, G. 2021. [Acetic acid immersion – A reactive pest treatment for bivalve aquaculture](#). Aquaculture 533: 1-11.
- California Department of Fish and Wildlife 2013. [Aquatic Invasive Species Disinfection/Decontamination Protocol](#). Accessed November 2020. California (USA). 10 p.
- Canadian Council on Invasive Species 2021. [Clean, Drain, Dry: Prevent the Spread of Aquatic Invasive Species](#). Accessed February 2021.
- Carman, M.R., Morris, J.A., Karney, R.C., Grunden, D.W. 2010. [An initial assessment of native and invasive tunicates in shellfish aquaculture of the North American east coast](#). J. Appl. Ichthyol. 26: 8-11.
- Carman, M.R., Lindell, S., Green-Beach, E., Starczak, V.R. 2016. [Treatments to eradicate invasive tunicate fouling from blue mussel seed and aquaculture socks](#). Manag. Biol. Invasions 7(1): 101-110.
- Carver, C.E., Chrisholm, A., Mallet, A.L. 2003. Strategies to mitigate the impact of *Ciona intestinalis* (L.) biofouling on shellfish production. J. Shellfish Res. 22(3) : 621-631.
- Chan, F.T., Briski, E. 2017. [An overview of recent research in marine biological invasions](#). Mar. Biol. 164 (121).
- Cheng, Y.W., LeClair, L.L. 2011. [A quantitative evaluation of the effect of freezing temperatures on the survival of New Zealand mudsnails \(*Potamopyrgus antipodarum*, Gray, 1843\), in Olympia Washington's Capitol Lake](#). Aquat. Invasions 6(1): 47-54.
- Cherry, D.S., Roy, R.L., Lechleitner, R.A., Dunhardt, P.A., Peters, G.T., Cairns, J. Jr. 1986. *Corbicula* fouling and control measures at the Celco plant, Virginia. Proceedings of the Second International Corbicula Symposium (Special Edition). Am. Malacol. Bull. pp. 69-82.
- Choi, W.J., Gerstenberger, S., McMahon, R.F., Wong, W.H. 2013. [Estimating survival rates of quagga mussel \(*Dreissena rostriformis bugensis*\) veliger larvae under summer and autumn temperature regimes in residual water of trailered watercraft at Lake Mead, USA](#). Manag. Biol. Invasions 4: 61–69.
- Cimino, S., Strecker, A.L. 2014. OSMB Final Report: Task 6. Tenmile Lake Boat Wash Effectiveness Monitoring. Portland State University. 18 p + appendices.
- Clarke Murray, C., Pakhomov, E.A., Therriault, T.W. 2011. [Recreational boating: a large unregulated vector transporting marine invasive species](#). Divers. Distrib. 17: 1161-1172.
- Clavero, M., García-Berthou, E. 2005. [Invasive species are a leading cause of animal extinctions](#). Trends Ecol. Evol. 20(3):110. Epub. PMID: 16701353.
- Cockman, J., Gibbons, A., Kelly, S. 2012. [Decontamination for whirling disease on the seeley fire in Utah 2012: Sharing an Important Process with our Fellow Teams](#). Accessed December 2020. United States Department of Agriculture, U.S. Forest Service (USA). 27 p. + appendices.
- Collas, F.P.L., Koopman, K.R., Hendriks, A.J., van der Velde, G., Verbrugge, L.N.H., Leuven, R.S.E.W. 2014. [Effects of desiccation on native and non-native molluscs in rivers](#). Freshwater Biol. 59: 41-55.
- Comeau, S.R., Rainville, S., Baldwin, W., Austin, E., Gerstenberger, S., Cross, C., Wong, W.H. 2011. [Susceptibility of quagga mussels \(*Dreissena rostriformis bugensis*\) to hot-water sprays as a means of watercraft decontamination](#). Biofouling 27: 267-274.
-

-
- Comeau, L.A., Sonier, R., Guyondet, T., Landry, T., Ramsay, A., Davidson, J. 2017. [Behavioural response of bivalve molluscs to calcium dioxide](#). *Aquaculture* 466: 78-85.
- Costello, M.J., Coll, M., Danovaro, R., Halpin, P., Ojaveer, H., Miloslavich, P. 2010. [A census of marine biodiversity knowledge, resources, and future challenges](#). *PLoS ONE* 5(8): e12110.
- Coughlan, N.E., Cuthbert, R.N., Dickey, J.W.E., Crane, K., Caffrey, J.M., Lucy, F.E., Davis, E., Dick, J.T.A. 2019. [Better biosecurity: spread-prevention of the invasive Asian clam, *Corbicula fluminea* \(Muller, 1774\)](#). *Manag. Biol. Invasions* 10: 111-126.
- Coughlan, N.E., O'Hara, S., Crane, K., Dick, J.T.A., Maclsaac, H.J., Cuthbert, R.N. 2020a. [Touch too much: aquatic disinfectant and steam exposure treatments can inhibit further spread of invasive bloody-red mysid shrimp *Hemimysis anomala*](#). *Wetl. Ecol. Manag.* 28: 397-402.
- Coughlan, N.E., Bradbeer, S.J., Cuthbert, R.N., Cunningham, E.M., Crane, K., Potts, S., Caffrey, J.M., Lucy, F.E., Dunn, A.M., Davis, E., Renals, T., Quinn, C., Dick, J.T.A. 2020b. [Better off dead: assessment of aquatic disinfectants and thermal shock treatments to prevent the spread of invasive freshwater bivalves](#). *Wetl. Ecol. Manag.* 28: 285-295.
- Coutts, A.D.M., Forrest, B.M. 2005. Evaluation of eradication tools for the clubbed tunicate *Styela clava*. Report No. 1110. Cawthron Institute, Nelson (New-Zealand). 48 p.
- Coutts, A.D.M. 2006. An evaluation of incursion response tools for invasive species; a case study of *Didemnum vexillum* in the Marlborough Sounds. Cawthron Institute, Nelson (New-Zealand). Report No. 1093. 84 p.
- Coutts, A.D.M., Forrest, B.M. 2007. [Development and application of tools for incursion response: Lessons learned from the management of the fouling pest *Didemnum vexillum*](#). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 342: 154-162.
- Craft, C.D., Myrick, C.A. 2011. Evaluation of quagga mussel veliger thermal tolerance. Colorado Division of Wildlife Task Order. Report # CSU1003, Colorado State University, Colorado (USA). 21 p.
- Crane, K., Cuthbert, R.N., Dick, J.T.A., Kregting, L., Maclsaac, H.J., Coughlan, N.E. 2019. [Full steam ahead: direct steam exposure to inhibit spread of invasive aquatic macrophytes](#). *Biol. Invasions* 21: 1311-1321.
- Crane, K., Cuthbert, R., Cunningham, E., Bradbeer, S.J., Eagling, L., Kregting, L., Dick, J.T.A., Dunning, A.M., Smith, E.R.C., Shannon, C., Caffrey, J., Lucy, F.E., Davis, E., Coughlan, N. 2020. [Tomorrow Never Dies: biodegradation and subsequent viability of invasive macrophytes following exposure to aquatic disinfectants](#). *Manag. Biol. Invasions* 11:26-43.
- Curtis, L.J.F., Pearce, C.M., Hodes, V., Nelson, J.C., Wasser, C., Savery, J., Therriault, T.W. 2021. [Mitigating non-indigenous species movements: effects of pressure-washing intensity and duration on the removal of biofouling and mobile invertebrates from cultured Pacific oysters \(*Crassostrea gigas* \(Thunberg, 1793\)\)](#). *Manag. Biol. Invasions* 3: 618-639.
- Cuthbert, R.N., Coughlan, N.E., Crane, K., Caffrey, J.M., Maclsaac, H.J., Dick, J.T.A. 2018. *Manag. Biol. Invasion.* 9:259–265.
- Cuthbert, R.N., Crane, K., Dick, J.T.A., Caffrey, J.M., Maclsaac, H.J., Coughlan, N.E. 2019. [Die Hard: survival and viability of invasive *Elodea nuttallii* following submergence in aquatic disinfectants](#). *Aquat. Bot.*154:11–17.
-

-
- Darbyson, E.A., Hanson, J.M., Locke, A., Willison, J.H.M. 2009. [Survival of European Green Crab \(*Carcinus maenus* L.\) exposed to simulated overland and boating-vector transport conditions](#). J Shellfish Res. 28: 377-382.
- David, M. 2015. Vessels and ballast water. *In*: Global maritime transport and ballast water management: issues and solutions. Invading nature – Springer series in invasion ecology, David, M., Gollasch, S. (Eds). pp. 13-34, Springer, Dordrecht.
- Davidson, J., Arsenault, G., MacNair, N., Landry, T., Bourque, D. 2005. Reproduction, epidemiology and control of the clubbed tunicate, *Styela clava*. AFRI Project Final Report #043AR15. PEI Aquaculture Alliance and PEI Aquaculture and Fisheries Research Initiative, Prince Edward Island (Canada). 33 p.
- Davis, E.A., Wong, D., Harman, W.N. 2015a. [Distilled white vinegar \(5% acetic acid\) as a potential decontamination method for adult zebra mussels](#). Manag. Biol. Invasions 6(4): 423-428.
- Davis, E.A., Wong, W.H., Harman, W.N. 2015b. [Comparison of three sodium chloride chemical treatments for adult zebra mussel decontamination](#). J. Shellfish Res. 34: 1029-1036.
- Davis, E.A. 2016. Determining effective decontamination methods for watercraft exposed to zebra mussels, *Dreissena polymorpha* (Pallas 1776), that do not use hot water with high pressure spray. Occasional Paper, State University of New York Oneonta, New York (USA). 85 p.
- Davis, E.A., Wong, W.H., Harman, W.N. 2016. [Livewell flushing to remove zebra mussel \(*Dreissena polymorpha*\) veligers](#). Manag. Biol. Invasions 7: 399-403.
- Davis, E.A., Wong, W.H., Harman, W.N. 2018. [Toxicity of potassium chloride compared to sodium chloride for zebra mussel decontamination](#). J. Aquat. Anim. Health 30: 3-12.
- De Stasio, B.T., Acy, C.N., Frankel, K.E., Fritz, G.M., Lawhun, S.D. 2019. [Tests of disinfection methods for invasive snails and zooplankton: effects of treatment methods and contaminated materials](#). Lake Reserv. Manag. 35: 156-166.
- Denny, C.M. 2008. [Development of a method to reduce the spread of the ascidian *Didemnum vexillum* with aquaculture transfers](#). ICES J. Mar. Sci. 65 : 805-810. DOI :
- Dijkstra, J., Dutton A., Westerman, E., Harris, L. 2008. [Heart rate reflects osmotic stress levels in two introduced colonial ascidians *Botryllus schlosseri* and *Botrylloides violaceus*](#). Mar. Biol. 154: 805-811.
- Diez, J.M., D'Antonio, C.M., Dukes, J.S., Grosholz, E.D., Olden, J.D., Sorte, C.J., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., Early, R., Ibáñez, I., Jones, S.J., Lawler, J.J., Miller, L.P. 2012. [Will extreme climatic events facilitate biological invasions?](#) Front. Ecol. Environ. 10: 249-257.
- DiVittorio, J., Grodowitz, M., Snow, J. 2012. [Inspection and cleaning manual for equipment and vehicles to prevent the spread of invasive species](#). U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Managing water in the West, Technical Memorandum #86-68220-07-05. Accessed December 2020. Xii + 221 p.
- Dobbs, M.G., Cherry, D.S., Scott, J.C., Pettrille, J.C. 1995. Environmental assessment of an alkyl dimethyl benzyl ammonium chloride (ADBAC) based molluscicide using laboratory Tests. Proceedings, Fifth International Zebra Mussel and Other Aquatic Nuisance Organisms Conference, February 21-24, 1995, Toronto, Canada, pp 87– 101.
- Doherty, F.G., Farris, J.L., Cherry, D.S., Cairns, J.Jr. 1986. [Control of the freshwater fouling bivalve *Corbicula fluminea* by halogenation](#). Arch. Environ. Contam. Toxicol. 15:535–542.
-

-
- Drake, D.A.R. 2017. [Overland spread of aquatic invasive species among freshwater ecosystems due to recreational boating in Canada](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/031. Vi + 38 p.
- Drake, D.A.R., Bailey, S.A., Mandrak, N.E. 2017. [Ecological Risk Assessment of Recreational Boating as a Pathway for the Secondary Spread of Aquatic Invasive Species in the Great Lakes Basin](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/030. V + 85 p.
- Drury, K.L.S., Rothlisberger, J.D. 2008. [Offense and defense in land- scape-level invasion control](#). *Oikos*. 117:182-190.
- Dukes, J.S., Mooney, H.A. 1999. [Does global change increase the success of biological invaders?](#) *Trends Ecol. Evol.* 14(4): 135-139. PMID: 10322518.
- Dwyer, W., Kerans, B., Gangloff, M. 2003. Effects of acute exposure to chlorine, copper sulfate, and heat on survival of New Zealand mudsnails. *Intermt. J. Sci.* 9:53-58.
- Elderkin, C.L., Klerks, P.L. 2005. Variation in thermal tolerance among three Mississippi River populations of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*. *J. Shellfish Res.* 24(1): 221-226.
- Ellis, S., Maclsaac, H.J. 2009. [Salinity tolerance of Great Lakes invaders](#). *Freshw. Biol.* 54: 77-89.
- Elwell, L.C. 2010. [Gear cleaning, does it really make a difference?](#) Accessed October 2020. Invasive species action network, Livingston, Montana (USA). 4 p.
- Elwell, L.C., Phillips, S. (Eds) 2021. [Uniform minimum protocols and standards for watercraft inspection and decontamination programs for dreissenid mussels in the Western United States \(UMPS IV\)](#). Pacific States Marine Fisheries Commission, Portland, Oregon (USA). 55 p.
- Evans, C.A., Kelting, D.L., Forrest, K.M., Steblen, L.E. 2011. Fragment viability and rootlet formation in Eurasian watermilfoil after desiccation. *J. Aquat. Plant Manag.* 49: 57-62.
- Ferk, F., Misik, M., Hoelzl, C., Uhl, M., Fuerhacker, M., Grillitsh, B., Parazefall, W., Nersesyanyan, A., Micieta, K., Grummt, T., Ehrlich, V., Knasmüller, S. 2007. [Benzalkonium chloride \(BAC\) and dimethyldioctadecyl-ammonium bromide \(DDAB\), two common quaternary ammonium compounds, cause genotoxic effects in mammalian and plant cells at environmentally relevant concentrations](#). *Mutagenesis* 22(6): 363-370.
- Fernald, R., Watson, B.T. 2014. Eradication of Zebra Mussels (*Dreissena polymorpha*) from Millbrook Quarry, Virginia – Rapid response in the real world. *Quagga and zebra mussels: biology, impacts, and control*, chapter 13. Pp. 195-213.
- Forrest, B. M., Blakemore, K. A. 2006. [Evaluation of treatments to reduce the spread of a marine plant pest with aquaculture transfers](#). *Aquaculture* 257(1-4): 333-345.
- Forrest, B. M., Hopkins, G. A., Dodgshun, T. J., Gardner, J. P. A. 2007. [Efficacy of acetic acid treatments in the management of marine biofouling](#). *Aquaculture* 262 : 319-332. DOI :
- Gallardo, B., Bacher, S., Bradley, B., Comín, F.A., Gallien, L., Jeschke, J.M., Sorte, C.J.B., Vilà, M. 2019. InvasiBES: [Understanding and managing the impacts of Invasive alien species on biodiversity and ecosystem services](#). *NeoBiota* 50:109–122.
- García, M.T., Ribosa, I., Guindulain, T., Sánchez-Leal, J., Vives-Rego, J. 2001. [Fate and effect of monoalkyl quaternary ammonium surfactants in the aquatic environment](#). *Environ. Pollut.* 111:169-175.
-

-
- Garton, D.W., Berg, D.L., Fletcher, R.J. 1990. [Thermal tolerances of the predatory cladocerans *Bythotrephes cederstroemi* and *Leptodora kindtii*: relationship to seasonal abundance in Western Lake Erie](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 47 :731-738. DOI :
- Gill, K., MacNair, N., Morrison, A. 2007. Investigation into the life cycle, impact on mussel culture and mitigation strategies for the vase tunicate (*Ciona intestinalis*), a new invasive species in the Montague/Brudenell River systems. Final Report #062AR20. PEI Aquaculture Alliance and PEI Department of Fisheries and Aquaculture, Prince Edward Island (Canada). 73 p.
- Gonzalez, J.G., Yevich, P. 1976. Response of an estuarine population of the blue mussel *Mytilus edulis* to heated water from a steam generating plant. Mar. Biol. 24: 177-189.
- Goss, L.B., Jackson, J.M., Flora, H.B., Isom, B.G., Gooch, C., Murray, S.A., Burton, C.G., Bain, W.S. 1979. Control studies on *Corbicula* for steam-electric generating plants. In: Britton, J.C. (ed). Proceedings, First International *Corbicula* Symposium. Texas Christian University Research Foundation, Fort Worth, Texas, p 139.
- Government of Alberta 2020. [Decontamination protocol for work in or near water](#). Accessed February 2021. Alberta (Canada). 24 p. + appendices.
- Government of Alberta 2021. [Clean, drain, dry your gear: Help prevent the spread of aquatic invasive species and diseases](#). Accessed Feb 2021.
- Government of British Columbia 2020a. Watercraft inspection and decontamination training manual. Ecosystems Branch and Conservation Officer Services, BC Ministry of Environment and Climate Change Strategy. British Columbia Invasive Mussel Defence Program. British Columbia (Canada). 162 p.
- Government of British Columbia 2020b. British Columbia Dreissenid Mussel Lake Monitoring Field Protocol. British Columbia (Canada). 48 p.
- Government of British Columbia 2021a. [What can you do? – Practice clean, drain, and dry](#). Accessed online February 2021. B.C. Conservation Officer Service, British Columbia (Canada).
- Government of British Columbia 2021b. [B.C. watercraft inspection stations](#). Accessed online February 2021. B.C. Conservation Officer Service, British Columbia (Canada).
- Government of British Columbia 2021c. [Invasive mussel defence program](#). Accessed online February 2021. B.C. Conservation Officer Service, British Columbia (Canada).
- Government of Manitoba 2021a. [Decontamination](#). Accessed online February 2021. Manitoba (Canada).
- Government of Manitoba 2021b. [The Water Protection Act – Aquatic Invasive Species Regulation](#). #173/2015. Accessed February 2021. Manitoba (Canada). 33 p.
- Government of Newfoundland and Labrador 2021. [Exotic and alien invasive species](#). Accessed online February 2021. Ministry of Fisheries, Forestry and Agriculture, Newfoundland and Labrador (Canada).
- Government of Northwest Territories 2021. [Invasive alien species](#). Accessed online February 2021. Ministry of Environment and Natural Resources, Northwest Territories (Canada).
- Government of Nunavut 2021. [Non-native invasive species in Nunavut \(brochure\)](#). Accessed online February 2021. Department of Environment, Nunavut (Canada).
-

-
- Government of Saskatchewan 2020. [Stop aquatic invasive species – Clean drain dry your boat](#). Accessed online October 2020. Ministry of Environment, Saskatchewan (Canada).
- Government of Saskatchewan 2021. [No invasive mussels found in Saskatchewan waters in 2020](#). Accessed online February 2021. Aquatic invasive species monitoring program, Ministry of Environment, Saskatchewan (Canada).
- Government of Yukon 2021. [Aquatic invasive species](#). Accessed online February 2021. Science and Natural Resources, Fish and Wildlife species, Yukon (Canada).
- Greenshields, F., Ridley, J.F. 1957. Some researches on the control of mussels in water pipes. *J. Inst. Water. Eng.* 11: 300-6.
- Great Britain Non-Native Species Secretariat 2021. [Check, Clean, Dry – Help stop the spread of invasive plants and animals in our waters!](#) Accessed online March 2021. Department for Environment, Food, and Rural Affairs, Scottish Government and the Welsh Assembly Government (United Kingdom).
- Guareschi, S., Wood, P.J. 2020. [Exploring the desiccation tolerance of the invasive bivalve *Corbicula fluminea* \(Müller 1774\) at different temperatures](#). *Biol. Invasions* 22: 2813-2824.
- Haight, R.G., Kinsley, A.C., Kao, S.Y., Yemshanov, D., Phelps, N.B.D. 2021. [Optimizing the location of watercraft inspection stations to slow the spread of aquatic invasive species](#). *Biol. Invasions* 23:3907–3919.
- Haque, N., Cho, D., Mee Lee, J., Su Lee, D., Kwon, S. 2014. [Proactive approach for biofouling control: Consequence of chlorine on the veliger larvae of *Mytilus edulis* under laboratory condition](#). *Environ. Eng. Res.* 19(4): 375-380.
- Haque, N., Mahabub, A., Cho, D., Kwon, S. 2015. [Sensitivity of veliger larvae of *Mytilus edulis* and mussel of various sizes to chlorination](#). *Toxicol. Environ. Chem.* 97(7):931-945.
- Haque, N., Kwon, S. 2017. Assessing the hydrogen peroxide effect along with sodium hypochlorite against marine blue mussels aimed at antifouling usage. *Environ. Eng. Res.* 22(1): 108-115.
- Harrington, D.K., Van Benschoten, J.E., Jensen, J.N., Lewis, D.P., Neuhauser, E.F. 1997. [Combined use of heat and oxidants for controlling adult zebra mussels](#). *Water Res.* 31(11): 2783-2791.
- Hedrick, R.P., McDowell, T.S., Mukkatira, K., MacConnell, E., Petri., B. 2008. [Effects of freezing, drying, ultraviolet irradiation, chlorine, and quaternary ammonium treatments on the infectivity of myxospores of *Myxobolus cerebralis* for *Tubifex tubifex*](#). *J. Aquat. Anim. Health* 20(2): 116-125.
- Hilliard, R., Polglaze, J. 2006. Review and evaluation of the biofouling protocol for vessels less than 25 m in length. Australian Quarantine and Inspection Service, URS Australia (Australia). Xiv + 136 p.
- Hillock, K.A., Costello, M.J. 2013. [Tolerance of the invasive tunicate *Styela clava* to air exposure](#). *Biofouling* 29(10): 1181-1187. DOI :
- Hoffman, G.L., Putz, R.E. 1969. [Host susceptibility and the effect of aging, freezing, heat, and chemicals on spores of *Myxosoma cerebralis*](#). *Prog. Fish Cult.* 31: 35-37.
- Hoffman, G.L., Markiw, M.E. 1977. [Control of whirling disease \(*Myxosoma cerebralis*\): use of methylene blue staining as a possible indicator of effect of heat on spores](#). *J. Fish Biol.* 10:181-183.
-

-
- Hofius, J., Mandella, C., Rackl, S.M. 2015. [Evaluation of watercraft quagga mussel decontamination in saltwater](#). *Manag. Biol. Invasions* 6: 277-286.
- Hopkins, G.A., Prince, M., Cahill, P.L., Fletcher, M., Atalah, J. 2016. [Desiccation as a mitigation tool to manage biofouling risks: trials on temperate taxa to elucidate factors influencing mortality rates](#). *Biofouling* 32(1): 1-11.
- Hosea, R.C., Finlayson, B. 2005. [Controlling the spread of New Zealand Mud Snails on wading gear](#). Report #2005-02. Accessed November 2020. State of California Department of Fish and Game, Office of Spill Prevention and Response, California (USA). Vii + 17 p. + appendices.
- Hudson D.M., Sexton, D.J., Wint, D., Capizzano, C., Crivello, J.F 2018. [Physiological and behavioral response of the rgan shore crab, *Hemigrapsus sanguineus*, to salinity: Implications for estuarine distribution and invasion](#). *Peer J.* 6: e5446.
- Hulme, P.E. 2009. [Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization](#). *J. Appl. Ecol.* 46: 10-18.
- Inglis, G., Floerl, O., Woods, C. 2012. [Scenarios of vessel biofouling risk and their management](#). Technical paper #2012/07. Accessed March 2021. Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand Government (New-Zealand). Pp. 41-93.
- International Maritime Organization (IMO). 2004. International convention for the control and management of ships' ballast water and sediments, 2004. International Conference on Ballast Water Management for Ships, BWM/CONF/36, London, UK. 36 p.
- International Maritime Organization (IMO) 2012. [Guidance for minimizing the transfer of invasive aquatic species as biofouling \(hull fouling\) for recreational craft](#). Document #MEPC.1/Circ.792. Accessed March 2021. 7 p.
- Jackson, M.C. 2015. [Interactions among multiple invasive animals](#). *Ecology* 96: 2035-2041.
- Jackson, M.C., Evangelista, C., Zhao, T., Lecerf, A., Britton, R., Cucherousset, J. 2017. [Between-lake variation in the trophic ecology of an invasive crayfish](#). *Freshwater Biol.* 62: 1501-1510.
- Jensen, D.A. 2010. [Assessing the effectiveness of aquatic invasive species outreach influencing boater behavior in five states](#). Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy. 313 pp..
- Jerde, C.L., Barnes, M.A., Debuysen, E.K., Noveroske, A., Chadderton, W.L., Lodge, D.M. 2012. Eurasian watermilfoil fitness loss and invasion potential following desiccation during simulated overland transport. *Aquat. Invasions* 7: 135-142.
- Johnson, L.E., Ricciardi, A., Carlton, J.T. 2001. [Overland dispersal of aquatic invasive species: a risk assessment of transient recreational boating](#). *Ecol. Appl.* 11: 1789-1799.
- Joyce, P.W.S., Cuthbert, R.N., Kregting, L., Crane, K., Vong, G.Y.W., Cunningham, E.M., Dick, J.T.A., Coughlan, N.E. 2019. [Stay clean: direct steam exposure to manage biofouling risks](#). *Mar. Pollut. Bull.* 142: 465-469.
- Kappel, M. 2012. *Dreissena rostriformis bugensis*: desiccation of adult quagga mussels found in Lake Mead as a preventive measure against overland dispersal in the western United States. Thesis, University of Nevada, Las Vegas, Nevada (USA). Paper 1744. X + 81 p.

-
- Kelly, D.W. 2007. [Vectors and pathways for nonindigenous aquatic species in the Great Lakes](#). Transportation Research Board Special Report #291 – Great Lakes shipping, trade, and aquatic invasive species. Accessed March 2021. Report commissioned by The National Academies Committee on the St. Lawrence Seaway: Options to eliminate nonindigenous species into the Great Lakes, Phase 2. 27 p.
- Kelly, N.E., Wantola, K., Weisz, E., Yan, N.D. 2013. [Recreational boats as a vector of secondary spread for aquatic invasive species and native crustacean zooplankton](#). Biol. Invasions 15: 509-519.
- Kilgour, B.W., Mackie, G.L., Baker, M.A., Keppel, R. 1994. Effects of salinity on the condition and survival of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*). Estuaries 17(2): 385-393.
- Kim, K.U., Garbary, D.J. 2007. [Photosynthesis in *Codium fragile* \(Chlorophyta\) from a Nova Scotia estuary: responses to desiccation and hyposalinity](#). Mar. Biol. 151: 99-107.
- Klerks, P.L., Fraleigh, P.C. 1991. [Controlling adult zebra mussels with oxidants](#). J. Am. Water Works Assoc. 83: 92-100.
- Lacoursière-Roussel, A., Bock, D., Cristescu, M., Guichard, F., Girard, P., Legendre, P., McKindsey, C.W. 2012. [Disentangling invasion processes in a dynamic shipping - boating network](#). Mol. Ecol. 21:4227–4241.
- Lake Stewards of Maine 2019. [Beyond clean, drain and dry: advanced decontamination protocols for boats, trailers, and gear](#). Accessed November 2020. Maine (USA). 1 p.
- Langkilde, T., Thawley, C., Robbins, T. 2017. [Behavioral adaptations to invasive species: benefits, costs, and mechanisms of change](#). Adv. Study Behav. 49:199-235.
- Leblanc, N., Landry, T., Stryhn, H., Tremblay, R., McNiven, M., Davidson, J. 2005. [The effect of high air and water temperature on juvenile *Mytilus edulis* in Prince Edward Island, Canada](#). Aquaculture 243: 185-194.
- Lewis, D.P., Piontkowski, J.M., Straney, R.W., Knowlton, J.J., Neuhauser, E.F. 1997. Use of potassium for treatment and control of zebra mussel infestation in industrial fire protection water system. Fire Technol. 33(4): 356-371.
- Lévesque, B., Lavoie, M., Joly, J. 2004. [Residential water heater temperature: 49 or 60 degrees Celsius?](#) Can. J. Infect. Dis. 15:11-12.
- Li, X., Brownawell, B.J. 2010. [Quaternary ammonium compounds in urban estuarine sediment environments—a class of contaminants in need of increased attention](#). Environ. Sci. Technol. 44:7561-7568.
- Locke, A., Doe, K.G., Fairchild, W.L., Jackman, P.M., Reese, E.J. 2009. [Preliminary evaluation of effects of invasive tunicate management with acetic acid and calcium hydroxide on non-target marine organisms in Prince Edward Island, Canada](#). Aquat. Invasions 4(1): 221-236.
- Lodge, D.M., Shrader-Frechette, K. 2003. [Nonindigenous species: ecological explanation, environmental ethics, and public policy](#). Conserv. Biol. 17(1): 31-37.
- Mack, R.N., Simberloff, D., Lonsdale, W.M., Evans, H., Clout, M., Bazzaz, F.A. 2000. [Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control](#). Ecol. Appl. 10: 689-710.
- MacNair, N. 2002. [Codium fragile treatment trials](#). Report #AIN10.2002. Accessed November 2020. Aqua Info – Aquaculture Notes. Government of Prince Edward Island (Canada). 4 p.

-
- MacNair, N., Morison, A., Mills, C., Campbell, E. 2006. Investigation into the life cycles, impact on mussel culture and mitigation strategies for two new invasive colonial tunicates, the golden star and the violet tunicate. Savage Harbour PEI: AFRI Report 060AR18. PEI Department of Agriculture, Fisheries, and Aquaculture, Fisheries and Aquaculture Division, Charlottetown, PEI (Canada). Iv + 20 + appendices.
- MacNair, N. 2009. [Control of Green Algae on Mussel Seed Collectors](#). Report #AIN22.2009. Accessed March 2021. Aqua Info-Aquaculture Notes. Government of Prince Edward Island (Canada). 4 p.
- MacIsaac, H.J., Robbins, T.C., Lewis, M.A. 2002. [Modelling ships' ballast water as invasion threats to the Great Lakes](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 59:1245–1256.
- Magellan, K. 2020. Prayer animal release: [An understudied pathway for introduction of invasive aquatic species](#). Aquat. Ecosyst. Health. 22(4): 452-461.
- Marine Pest Sectoral Committee 2018a. [National biofouling management guidelines for recreational vessels](#). Accessed March 2021. Australian Government, Department of Agriculture and Water Resources, Canberra (Australia). 9 p.
- Marine Pest Sectoral Committee 2018b. [National biofouling management guidelines for non-trading vessels](#). Accessed March 2021. Australian Government, Department of Agriculture and Water Resources, Canberra (Australia). 43 p.
- Martin, M.D., Mackie, G.L., Baker, M.A., 1993a. [Control of the biofouling mollusk, *Dreissena polymorpha* \(Bivalvia: Dreissenidae\), with sodium hypochlorite and with polyquaternary ammonia and Benzothiazole compounds](#). Arch. Environ. Contam. Toxicol. 24: 381-388.
- Martin, M.D., Mackie, G.L., Baker, M.A. 1993b. Acute toxicity tests and pulsed-dose delayed mortality at 12 and 22°C in the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*). Arch. Environ. Contam. Toxicol. 24: 389-398.
- Matthews, M.A., McMahon, R.F. 1999. Effects of temperature and temperature acclimation on survival of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) and Asian clams (*Corbicula fluminea*) under extreme hypoxia: J. Molluscan Stud. 65:317-325.
- Matisoff, G., Brooks, G., Bourland, B.I. 1996. Toxicity of chlorine dioxide to adult zebra mussels. J. Am. Water Works Assoc. 88: 93-106.
- Mattice, J.S., McLean, R.B., Burch, M.B. 1982. Evaluation of short-term exposure to heated water and chlorine for control of the Asiatic clam (*Corbicula fluminea*). Technical Report ORNL/TM-7808. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee (USA).
- McCann, L.D., Holzer, K.K., Davidson, I.C., Ashton, G.V., Chapman, M.D., Ruiz, G.M. 2013. [Promoting invasive species control and eradication in the sea: Options for managing the tunicate invader *Didemnum vexillum* in Sitka, Alaska](#). Mar. Pollut. Bull. 77: 165-171.
- McFarland, K., Baker, S., Baker, P., Rybovich, M., Volety, A.K. 2015. [Temperature, salinity, and aerial exposure tolerance of the invasive mussel, *Perna viridis*, in estuarine habitats: Implications for spread and competition with native oysters, *Crassostrea virginica*](#). Estuar. Coasts 38, 1619–1628.
- McKenzie, C.H., Matherson, K., Reid, V., Wells, T., Moulard, D., Green, D., Pilgrim, B., and Perry, G. 2016. [The development of a rapid response plan to control spread of the solitary invasive tunicate, *Ciona intestinalis* \(Linnaeus, 1767\), in Newfoundland and Labrador, Canada](#). Manag. Biol. 7(1): 87-100.
-

-
- McMahon, R.F., Ussery, T.A., Clarke, M. 1993. Use of emersion as a zebra mussel control method. Technical report EL-93-1. U.S. Army Corps of Engineers, Experiment Station, Vicksburg, Mississippi (USA). V + 27 p. + appendix.
- McMahon, R.F., Ussery, T.A., Clarke, M. 1994. Review of zebra mussel control methods. Technical Note ZMR-2-14, U.S. Army corps of Engineers, Experiment Station, Vicksburg, Mississippi (USA). 12 p.
- McMahon, R.F., Ussery, T.A. 1995. Thermal tolerance of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) relative to rate of temperature increase and acclimatation temperature. Technical report EL-95-10, U.S. Army corps of Engineers, Experiment Station, Vicksburg, Mississippi (USA). V + 19 p. + appendices.
- MFFP (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs) 2018. [Guide to best practices in aquatic environments to prevent the introduction and propagation of aquatic invasive species](#). Accessed October 2020. Gouvernement du Québec, Québec (Canada). Xi + 35 p.
- Michigan Department of Environmental Quality 2014. [Policy and procedure: Invasive Species Decontamination for Field Operations in Michigan](#). Report #QOL-2-2014. Accessed November 2020.. Accessed November 2020. Michigan Department of Environmental Quality, Department of Natural Resources, and Department of Agriculture and Rural Development. Michigan (USA). 25 p.
- Miller, N., Richardson, P., Collins, E., Young, K. 2006. [Design and feasibility of wash-down stations for boats entering the Rotorua Lakes](#). Doc Research and Development Series #247. Accessed October 2020. Science and Technical Publishing Department of Conservation (Pub.), Wellington (New-Zealand). 25 p.
- Mills, E.L., Leach, J.H., Carlton, J.T., Secor, C.L. 1993. [Exotic species in the Great Lakes: a history of biotic crises and anthropogenic introductions](#) J. Great Lakes Res. 19(1): 1-54.
- Mills, E.L., Edward, L., Leach, J.H., Carlton, J.T., Secor, C.L. 1994. [Exotic species and the integrity of the Great Lakes: Lessons from the past](#). Bioscience 44(10): 666-676.
- Mineur, F., Belsher, T., Johnson, M.P., Maggs, C.A., Verlaque, M. 2007. [Experimental assessment of oyster transfers as a vector for macroalgal introductions](#). Biol. Conserv. 137 : 237-247. DOI :
- Minnesota Department of Natural Resources 2013. [Aquatic Invasive Species \(AIS\) Watercraft Decontamination Handbook for Lake Service Providers](#). Accessed October 2020. Minnesota Government, Minnesota (USA). 11 p.
- Minnesota Department of Natural Resources 2017. [Aquatic invasive species and the watercraft inspection program, watercraft decontamination manual](#). Accessed October 2020. Minnesota Government, Minnesota (USA). Ix + 68 p.
- Moffitt, C.M., Barenberg, A., Stockton, K.A., Watten, B.J. 2015. Efficacy of two approaches for disinfecting surfaces and water infested with quagga mussel veligers. Biology and management of invasive quagga and zebra mussels in the Western United States, CRC Press, USA, 467-477.
- Moffitt, C.M., Stockton-Fiti, K.A., Claudi, R. 2016. [Toxicity of potassium chloride to veliger and byssal stage of dreissenid mussels related to water quality](#). Manag. Biol. Invasions 7(3): 257-268.
- Mohit, S., Johnson, T.B., Arnott, S.E. 2021. [Recreational watercraft decontamination: can current recommendations reduce aquatic invasive species spread?](#) Manag. Biol. Invasions 12 (1):148-164.
-

-
- Morse, J.T. 2009. [Assessing the effects of application time and temperature on the efficacy of hot-water sprays to mitigate fouling by *Dreissena polymorpha* \(zebra mussels Pallas\)](#). *Biofouling* 25: 605-610.
- MPO. 2016. [Examen des incidences possibles des traitements à la chaux hydratée dans le contexte du projet d'expansion de la production de moules dans la baie Malpeque, à l'Île-du-Prince-Édouard](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2016/014.
- Muñoz L., Kelley A.L.D., Rivera, C.E. 2017. [The effect of salinity acclimation on the upper thermal tolerance threshold of the European Green Crab](#). *Ocean & Fish Open Access J.* 4: 555627.
- National Research Council of Canada (NRCC), 2015. [« National Plumbing Code of Canada: 2015 »](#). Canadian Commission On Building And Fire Codes.
- NBISC (New Brunswick Invasive Species Council 2019). [Clean drain dry – Prevent the spread of aquatic invasive species](#). Accessed online February 2021. New Brunswick (Canada).
- New York State Department of Environment Conservation 2015. [A New York boaters guide to cleaning, drying and disinfecting boating equipment](#). Accessed October 2020. New York (USA). 6 p.
- New Zealand Government 2020. [Check, Clean, Dry: Preventing didymo and other pests](#). Accessed online February 2021. Ministry for Primary Industries (New Zealand).
- NSISC (Nova Scotia Invasive Species Council) 2020. [Clean drain dry](#). Accessed online February 2021. Nova Scotia (Canada).
- Nicastro, K.R., Zardi, G.I., McQuaid, C.D., Stephens, L., Radloff, S., Blatch, G.L. 2010. [The role of gaping behaviour in habitat partitioning between coexisting intertidal mussels](#). *BMC Ecol.* 10:17.
- OMNRF (Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry) 2017. [Boater Action Plan](#). Accessed February 2021. Government of Ontario, Ontario (Canada). 1 p.
- Oplinger, R.W., Wagner, E. 2011. [Tests of the ability of five disinfectants to kill New Zealand mudsnails](#). *J. Appl. Aquacult.* 23(2): 187-197.
- Paetzold, S.C., Hill, J., Davidson, J. 2012. [Efficacy of high-pressure seawater spray against colonial tunicate fouling in mussel aquaculture: inter-annual variation](#). *Aquat. Invasions* 7(4): 555-566.
- Page, M.J., Morrissey, D.J., Handley, S.J., Middleton, C. 2011. [Biology, ecology and trials of potential methods for control of the introduced ascidian *Eudistoma elongatum* \(Herdman, 1886\) in Northland, New Zealand](#). *Aquat. Invasions* 6(4) : 515-517. DOI :
- Pagnucco, K.S., Maynard, G.A, Fera, S., Yan, N.D, Nalepa, T.F, Ricciardi, A. 2015. [The future of species invasions in the Great Lakes-St. Lawrence River basin](#). *J. Great Lakes Res.* 41:96–107. DOI :
- Pannell, A., Coutts, A.D.M., 2007. Treatment methods used to manage *Didemnum vexillum* in New Zealand. New Zealand Marine Farming Association Incorporated Report. Submitted to M.A.F. Biosecurity New Zealand. 29 p.
- Payne, B.S. 1992. Freeze survival of aerially exposed zebra mussels. Technical Note ZMR-2-09, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES), Arlington, Texas (USA). 2 p.

-
- Peck, L.S., Morley, S.A., Richard, J., Clark, M.S., Davies, S.A., Dow, J.A.T., Lukowiak, K. 2014. Acclimation and thermal tolerance in Antarctic marine ectotherms. *J. Exp. Biol.* 217 (1): 16–22.
- PEIISC (Prince Edward Island Invasive Species Council) 2021. [PEI invasive species council](#). Accessed February 2021. Prince Edward Island (Canada).
- Pelletier-Rousseau, M., Bernier, R., Clarke Murray, C., Drolet, D., Lacoursière-Roussel, A., Locke, A., Martin, J.L., McKenzie, C.H., Mckindsey, C.W., Therriault, T.W., Simard, N. 2019. [Assessment of recreational boating as a vector for marine non-indigenous species on the Atlantic coast of Canada](#). *Biol. Invasions* 21: 2447-2470.
- Piola, R.F., Dunmore, R.A., Forrest, B.M. 2009. [Assessing the efficacy of spray delivered 'ecofriendly' chemicals for the control and eradication of marine fouling pests](#). *Biofouling* 26: 187-203.
- Rajagopal, S., Van der Velde, G., Jenner, H.A. 2002. [Effects of low-level chlorination on zebra mussel, *Dreissena polymorpha*](#). *Water Res.* 36: 3029-3034.
- Rajagopal, S., Van der Velde, G., Van der Gaap, M., Jenner, H.A. 2003. How effective is intermittent chlorination to control adult mussel fouling in cooling water systems? *Water Res.* 37: 329-338.
- Rajagopal, S., Van Der Velde, G., Van Der Gaag, M., Jenner, H.A. 2005. [Factors influencing the upper temperature tolerances of three mussel species in a brackish water canal: size, season and laboratory protocols](#). *Biofouling* 21: 87-97.
- Ramsay, G.G., Tackett, J.H., Morris, D.W. 1988. [Effect of low-level continuous chlorination on *Corbicula fluminea*](#). *Environ. Toxicol. Chem.* 7 : 855-856. DOI :
- Ramsay, A. 2014. High-pressure water application to control the vase tunicate and increase mussel productivity. Report #AIN23.2014. Accessed July 2021. Aqua Info – Aquaculture Notes. Government of Prince Edward Island (Canada). 4 p.
- Ramsay, A., Gill, K., Morrison, A., MacNair, N. 2014. Hydrated lime application by the PEI aquaculture industry. Technical Report #253. Government of Prince Edward Island, Department of Fisheries, Aquaculture and Rural Development, Aquaculture Division, Prince Edward Island (Canada). 35 p.
- Ramsay, A. 2015a. [Fresh water treatment as a management tool to control the spread of colonial tunicates](#). Report #AIN 25. Accessed November 2020. Aqua Info – Aquaculture Notes. Government of Prince Edward Island (Canada). 4 p.
- Ramsay, A. 2015b. [Fresh water immersion to control de Vase Tunicate, *Ciona intestinalis*](#). Report #AIN 26. Accessed November 2020. Aqua Info, Aquaculture Notes. Government of Prince Edward Island (Canada). 4 p.
- Ramsay, A. 2015c. [Fresh water immersion to control the Clubbed Tunicate, *Styela clava*](#). Report #AIN 27. Accessed November 2020. Aqua Info – Aquaculture Notes. Government of Prince Edward Island (Canada). 2 p.
- Reid, D.F., Orlova M. 2002. [Geological and evolutionary underpinnings for the success of Ponto-Caspian species invasions in the Baltic Sea and North American Great Lakes](#). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59:1144–1158.
- Ricciardi, A., Serrouya, R., Whoriskey, F.G. 1995. [Aerial exposure tolerance of zebra and quagga mussels \(*Bivalvia: Dreissenidae*\): implications for overland dispersal](#). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52: 470–477.
-

-
- Ricciardi, A., Rasmussen, J.B. 1998. [Predicting the identity and impact of future biological invaders: a priority for aquatic resource management](#). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 55:1759-1765.
- Ricciardi, A. 2006. [Patterns of invasion in the Laurentian Great Lakes in relation to changes in vector activity](#). Divers. Distrib. 12 : 425-433.
- Ricciardi, A. 2007. [Are modern biological invasions an unprecedented form of global change?](#) Conserv. Biol. 21: 329-336.
- Richards, D.C., O'Connell, P., Shinn, D.C. 2004. [Simple control method to limit the spread of the New Zealand mudsnail *Potamopyrgus antipodarum*](#). N. Am. J. Fish. Manag. 24: 114-117.
- Roche, R.C., Monnington, J.M., Newstead, R.G., Sambrook, K., Griffith, K., Holt, R.H.F., Jenkins, S.R. 2015. [Recreational vessels as a vector for marine non-natives: developing biosecurity measures and managing risk through an in-water encapsulation system](#). Hydrobiologia 750(1): 187-199.
- Rolheiser, K.C., Dunham, A., Switzer, S.E., Pearce, C.M., Therriault, T.W. 2012. [Assessment of chemical treatments for controlling *Didemnum vexillum*, other biofouling, and predatory sea stars in Pacific oyster aquaculture](#). Aquaculture 364-365: 53-60.
- Rothlisberger, J.D., Chadderton, W.L., McNulty, J. 2010. [Aquatic invasive species transport via trailered boats: what is being moved, who is moving it, and what can be done](#). Fisheries 35: 121-132.
- Rothlisberger, J.D., Lodge, D.M. 2011. [Limitations of gravity models in predicting the spread of Eurasian watermilfoil](#). Conserv. Biol. 25:64-72.
- Ruiz, G.M., Fofonoff, P.W., Carlton, J.T., Wonham, M.J., Hines, A.H. 2000. [Invasion of coastal marine communities in North America: apparent patterns, processes, and biases](#). Annu. Rev. Ecol. Syst. 31(1): 481-531.
- Sarkar, B., Megharaj, M., Xi, Y., Krishnamurti, G.S., Naidu, R. 2010. [Sorption of quaternary ammonium compounds in soils: implications to the soil microbial activities](#). J. Hazard. Mater. 184:448-456.
- Saul, W.-C., Roy, H.E., Booy, O., Carnevali, L., Chen, H.-J., Genovesi, P., Harrower, C.A., Hulme, P.E., Pagad, S., Pergl, J., Jeschke, J.M. 2017. [Assessing patterns in introduction pathways of alien species by linking major invasion data bases](#). J. Appl. Ecol. 54: 657-669.
- Scheffer, M., 2009. [Critical Transitions in Nature and Society](#). Princeton University Press, Princeton, New Jersey (USA). 400 p.
- Schisler, G.J., Vieira, N., Walker, P.G. 2008. [Application of household disinfectants to control New Zealand mudsnails](#). N. Am. J. Fish. Manage. 28(4): 1172-1176.
- Sebire, M., Rimmer, G., Hicks, R.J., Parker, S., Stebbing, P.D. 2018. [A preliminary investigation into biosecurity treatments to manage the invasive killer shrimp \(*Dikeroqammarus villosus*\)](#). Manag. Biol. Invasions 9: 101-113.
- Seuront, L., Nicastro, K.R., Zardi, G.I., and Goberville, E. 2019. [Decreased thermal tolerance under recurrent heat stress conditions explains summer mass mortality of the blue mussel *Mytilus edulis*](#). Sci. Rep. 9: 17498.
- Shannon, C., Quinn, C.H., Stebbing, P.D., Hassall, C., Dunn, A.M. 2018. [The practical application of hot water to reduce the introduction and spread of aquatic invasive alien species](#). Manag. Biol. Invasions 9: 417-423.
-

-
- Sharp, G.J., MacNair, N., Campbell, E., Butters, A., Ramsay, A., Semple, R. 2006. [Fouling of mussel \(*Mytilus edulis*\) collectors by algal mats, dynamics, impacts and symptomatic treatment in P.E.I.](#) Canada. *Sci. Asia* 32(1): 87-97.
- Schlisler GJ, Vieira NK, Walker PG (2008) Application of household disinfectants to control New Zealand mudsnails. *N. Am. J. Fish. Manage.* 28: 1172– 1176, 10.1577/M07-028.1
- Sievers, M., Dempster, T., Keough, M.J., Fitridge, I. 2019. [Methods to prevent and treat biofouling in shellfish aquaculture.](#) *Aquaculture.* 505: 263-270.
- Simard, N., Pelletier-Rousseau, M., Clarke Murray, C., McKindsey, C.W., Therriault, T.W., Lacoursière-Roussel, A., Bernier, R., Sephton, D., Drolet, D., Locke, A., Martin, J.L., Drake D.A.R., McKenzie, C.H. 2017. [National risk assessment of recreational boating as a vector for Marine Non-indigenous Species.](#) DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/006. Vi + 95 p.
- Simberloff, D., Martin, J.-L., Genovesi, P., Maris, V., Wardle, D.A., Aronson, J., Courchamp, F., Galil, B., García-Berthou, E., Pascal, M., Pyšek, P., Sousa, R., Tabacchi, E., Vilà, M. 2013. [Impacts of biological invasions: what's what and the way forward.](#) *Trends Ecol. Evol.* 28(1): 58-66.
- Simon, K.S., Townsend, C.R. 2003. [Impacts of freshwater invaders at different levels of ecological organization, with emphasis on salmonids and ecosystem consequences.](#) *Freshw. Biol.* 48: 982-994.
- Snider, J.P., Moore, J.D., Volkoff, M.C., Byron, S.N. 2014. Assessment of quagga mussel (*Dreissena bugensis*) veliger survival under thermal, temporal and emersion conditions simulating overland transport. *Calif. Fish Game* 100(4): 640-651.
- Spidle, A.P., May, B., Mills, E.L. 1995. [Limits to tolerance of temperature and salinity in the quagga mussel \(*Dreissena bugensis*\) and the zebra mussel \(*D. polymorpha*\).](#) *Can. J. of Fish. And Aquat. Sci.* 52(10): 2108-2119.
- Stebbing, P., Sebire, M., Lyons, B. 2011. Evaluation of a number of treatments to be used as biosecurity measures in controlling the spread of the invasive killer shrimp (*Dikerogammarus villosus*). Report C5256. Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science. Weymouth (England). 41 p.
- Stockton, K.A. 2011. Methods to assess, control, and manage risks for two invasive mollusks in fish hatcheries. M.S. Thesis, University of Idaho, Idaho (USA). Xix + 170 p.
- Stockton, K.A., Moffitt., C.M. 2013. [Disinfection of three wading boot surfaces infested with New Zealand mudsnails.](#) *N. Am. J. Fish. Manage.* 33: 529-538.
- Stout, J.B., Avila, B., Fetherman, E. 2016. . *N. Am. J. Fish. Manage.* 36: 277-284.
- Strayer, D.L. 2010. [Alien species in fresh waters: ecological effects, interactions with other stressors, and prospects for the future.](#) *Freshw. Biol.* 55: 152-174.
- Strayer, D.L., Smith, L.C. 1993. Distribution of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in estuaries and brackish waters. *In: Zebra Mussels: Biology, Impacts and Control.* Napela, T.F., Schloesser, D.W. (Eds), pp. 715–727. Lewis Publishers, Ann Arbor.
- Strayer, D.L. 2012. [Eight questions about invasions and ecosystem functioning.](#) *Ecol. Lett.* 15(10): 1199-1210.
- Switzer, S.E., Therriault, T., Dunham, W.A., Pearce, C.M. 2011. [Assessing potential control options for the invasive tunicate *Didemnum vexillum* in shellfish aquaculture.](#) *Aquaculture* 318(1-2): 145-153.
-

-
- Taylor, C.J.L. 2006. [The effects of biological fouling control at coastal and estuarine power stations](#). Mar. Pollut. Bull. 53:30–48.
- Tilly, L.J. 1976. Clam survival in chlorinated water. Report No. DP-1398. E. I. DuPont de Nemours & Company, Savannah River Laboratory, Aiken, SC.
- Ussery, T.A., McMahon, R.F. 1995. Comparative study of the desiccation resistance of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) and quagga mussels (*Dreissena bugensis*). Technical Report EL-95-6. U.S. Army Corps of Engineers, Experiment Station, Vicksburg, Mississippi (USA). iv + 19 p. + appendices.
- Utah Department of Natural Resources 2012. [Utah decontamination protocols to minimize risk for introduction or spread of aquatic invasive species](#). Accessed February 2021. State of Utah (USA). 5 p.
- Van Benschoten, J.E., Jensen, J.N., Brady, T.J., Lewis, D.P., Sferrazza, J., Neuhauser, E.F. 1993. [Response of zebra mussel veligers to chemical oxidants](#). Water Res. 27(4): 575-582.
- Vander Zanden, M.J., Casselman, J.M., Rasmussen, J.B. 1999. [Stable isotope evidence for the food web consequences of species invasions in lakes](#). Nature 401(6752): 464-467.
- Verween, A., Vincx, M., Degraer, S. 2009. [Comparative toxicity of chlorine and peracetic acid in the biofouling control of *Mytilopsis leucophaeata* and *Dreissena polymorpha* embryos \(Mollusca, Bivalvia\)](#). Int. Biodeterior. Biodegradation. 63(4): 523-528.
- Vitousek, P.M., D'Antonio, C.M., Loope, L.L., Westbrooks, R. 1996. Biological invasions as global environmental change. Am. Sci. 84: 468-478.
- Wada, T., Matsukura, K. 2011. [Linkage of cold hardiness with desiccation tolerance in the invasive freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* \(Caenogastropoda: Ampullariidae\)](#). J. Molluscan Stud. 77:149-153.
- Waller, D.L., Rach, J.J., Cope, W.G., Marking, L.L. 1993. Toxicity of candidate chemicals for zebra mussel control to selected nontarget organisms. J. Great Lakes Res. 19(4): 695-70.
- Waller, D.L., Fisher, S.W., Dabrowska, H. 1996. Prevention of zebra mussel infestation and dispersal during aquaculture operations. Prog. Fish-Cult. 58: 77-84.
- Wagner, E.J. 2002. Whirling disease prevention, control, management: a review. Am. Fish. Soc. 29: 217-225.
- Wagner, E.J., Smith, M., Arndt, R., Roberts, D.W. 2003. [Physical and chemical effects on viability of the *Myxobolus cerebralis* triactinomyxon](#). Dis. Aquat. Org. 53: 133-142.
- Washington Department of Fish and Wildlife 2016. [Invasive Species Management Protocols](#). Accessed February 2021. WDFW Invasive Species Management Committee, Washington (USA). 15 p.
- Watermann, B.T., Broeg, K., Krutwa, A., Heibeck, N. 2021. [Guide on best practices of biofouling management in the Baltic sea](#). Complete Report. 31p.
- Watkins, C.H., Hammerschlag, R.S. 1984. [The toxicity of chlorine to a common vascular aquatic plant](#). Water Res. 18(8): 1037-1043.
- Wisconsin Department of Natural Resources 2020. [Best management practices for boat, gear and equipment decontamination](#). Accessed October 2020. Wisconsin (USA).
-

-
- Wong, W.H., Gerstenberger, S., Watters, A. 2014. [Using pressurized hot water spray to kill and remove dreissenid mussels on watercraft: Field testing on the efficacy of water temperature, high pressure, and duration of exposure](#). Accessed October 2020. Report to U.S. Fish and Wildlife Service (USA). 20 p.
- Wyoming Game and Fish Department 2016. [State of Wyoming aquatic invasive species watercraft inspection manual](#). Wyoming Game and Fish Department, Cheyenne, Wyoming (USA). 26 p. + Appendices.
- Zhang, C., Cui, F., Zeng, G.-M., Jiang, M., Yang, Z.-Z., Yu, Z-G., Zhu, M.-Y., Shen, L.-Q. 2015. Quaternary ammonium compounds (QACs): [A review on occurrence, fate and toxicity in the environment](#). Sci. Total Environ. 518-519: 352-362.

8. TABLEAUX

Tableau 1. Récapitulatif des espèces aquatiques envahissantes marines et d'eau douce qui ont été évaluées dans le cadre du présent travail.

Groupe représentatif	Espèces aquatiques envahissantes
Bivalves	Moule zébrée (<i>Dreissena polymorpha</i>), moule quagga (<i>Dreissena rostriformis bugensis</i>), petite corbeille d'Asie (<i>Corbicula fluminea</i>) et moule bleue (<i>Mytilus edulis</i>)
Gastropodes	Nasse de Nouvelle-Zélande (<i>Potamopyrgus antipodarum</i>)
Zooplancton	Crevette rouge sang (<i>Hemimysis anomala</i>), cladocère épisneux (<i>Bythotrephes longimanus</i>), puce d'eau en hameçon (<i>Cercopagis pengoi</i>) et crevette tueuse (<i>Dikerogammarus villosus</i>)
Parasites	<i>Myxobolus cerebralis</i> , qui cause la maladie du tournis
Macrophytes	Myriophylle à épis (<i>Myriophyllum spicatum</i>), myriophylle aquatique (<i>Myriophyllum aquaticum</i>), hydrille verticillée (<i>Hydrilla verticillata</i>), cabomba de Caroline (<i>Cabomba caroliniana</i>) et potamot crépu (<i>Potamogeton Crispus</i>)
Macroalgues	Codium (<i>Codium fragile</i>) et, dans certains cas, espèces nuisibles semblables
Crabes	Crabe vert (<i>Carcinus maenas</i>)
Tuniciers solitaires	Ascidie plissée (<i>Styela Clava</i>), ascidie jaune (<i>Ciona intestinalis</i>) et ascidie sale (<i>Asciella aspersa</i>)
Tuniciers coloniaux	Botryloïde violet (<i>Botrylloides violaceus</i>), botrylle étoilé (<i>Botryllus schlosseri</i>), didemnum (<i>Didemnum vexillum</i>) et diplosoma (<i>Diplosoma listerianum</i>)

Tableau 2. Calcul de la cote d'incertitude associée à chaque traitement de décontamination efficace pour tuer le plus grand nombre d'espèces aquatiques envahissantes d'eau douce ou marines ciblées. Un niveau d'incertitude a été attribué à chaque option de traitement de décontamination par espèce, et une cote a été attribuée en fonction du nombre d'études disponibles (peu nombreuses, limitées, nombreuses ou exhaustives), de leur qualité (communication personnelle, rapport technique ou étude examinée par des pairs), ainsi que de leur concordance avec l'option de traitement efficace indiquée (conclusions contradictoires, différentes, généralement en accord ou en accord). Une cote d'incertitude n'a pas été calculée pour les traitements inefficaces. La cote finale est fondée sur la somme des cotes obtenues pour les sources de données, leur qualité et leur accord avec l'option de traitement de décontamination indiquée.

Sources de données	Cote	Qualité	Cote	Concordance	Cote	Cote finale	
Peu nombreuses (≤1 étude)	0	Communication personnelle	0	Conclusions contradictoires	0	Aucune donnée	0
Limitées (2 études)	1	Rapport technique	1	Conclusions différentes	1	Incertainité très élevée	1-2
Nombreuses (3 à 6 études)	2	Étude examinée par des pairs	2	Généralement en accord	2	Incertainité élevée	3-5
Exhaustives (≥ 7 études)	3	-	-	En accord	3	Incertainité raisonnable	6-7
	-	-	-	-	-	Incertainité faible	8

Tableau 3. Efficacité des traitements de décontamination physiques pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée, précisée ci-après par stade biologique, dans la mesure du possible. Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, HR : humidité relative, * : rapports techniques, Δ : expériences en laboratoire d'acclimatation. ** Les durées létales de séchage à l'air dépendent de l'humidité relative et de la taille (par exemple, moules de la famille des dreissenidés). Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.

EAE dulcicole	Immersion dans de l'eau chaude (temp.; durée)	Jet d'eau chaude		Séchage à l'air**		Congélation (temp.; durée)
		Basse pression (< 60 lb/po ²)	Haute pression (> 400 lb/po ²)	(≥ 20 °C)	(< 20 °C)	
		(temp.; pression; durée)	(temp.; pression; durée)	(temp.; HR; durée)	(temp.; HR; durée)	
MOLLUSQUES						
Moule zébrée (adultes) <i>Dreissena polymorpha</i>	100 % 32 °C; > 4 j ^{35Δ} 36 °C; 38 min ^{65Δ} 40 °C; 10 s ⁷¹ ; 30 min ^{65Δ} 43 °C; 5 min ⁹ 45 °C; 15 min ² 49 °C; 1 min ⁹ 99 % 58 °C; 10 s, 61 °C, 2 s ⁶¹ 95 % 30 °C; 275 h ⁴¹ 32 °C; 20 h ⁴¹ 36 °C; 30 min ⁴¹ Ca. 90 % 38 °C; 20 min ⁹ Pas efficace 32 °C; 20 min ⁹	100 % 40-50 °C; 2 lb/po ² ; 40 s ^{86*} 54-60 °C; 2 lb/po ² ; 10 s ^{86*} 60 °C; 15 lb/po ² ; 10 s ⁶² 70-80 °C; 2 lb/po ² ; 5 s ⁶² 80 °C; 15 lb/po ² ; 5 s ⁶² 100 °C; vapeur; 30 s ²⁶ Pas efficace 20 °C; 15 lb/po ² ; 10 s ⁶² 20 °C; 2 lb/po ² ; 160 s ^{86*} 40 °C; 2 lb/po ² ; 10 s ^{86*} 38-80 % 50 °C; 2 lb/po ² ; 5-10 s ^{86*}	100 % 67,4 °C; 1 600 lb/po ² ; 15 s ¹⁴ Élimination efficace NS ; 3 000 lb/po ² ; 32-52 s ^{86*} NS ; 1 500 lb/po ² ; 41-472 s ^{86*} 58-92 % 67,4 °C; 1 600 lb/po ² ; 5-10 s ¹⁴ 25-83 % 59 °C; 1 600 lb/po ² ; 5-15 s ¹⁴ 17-33 % 55,9 °C; 1 600 lb/po ² ; 5-15 s ¹⁴	100 % 20 °C; 10-95 %; 5-7 j ⁶⁷ 25 °C; 5-95 %; 3-4 j ^{58*} 30 °C; 10-95 %; 1-5 j ⁶⁷ 99 % 20 °C; NS; 16,2-58 h ⁶¹ 20 °C; 68 %; 42 h ²¹ 53-84 % 20 °C; 50, 95 %; 5 j ⁶⁷ Pas efficace Plusieurs combinaisons température/HR ^{58*, 67}	100 % 5°C; 5-95 %; 15-47 j ^{58*} 10°C; 10-95 %; 5-15 j ⁶⁷ 14 °C; HR NS; 6 j ² 15 °C; 5-95 %; 5-12 j ^{79*} 97 % 10 °C; 50 %; 5 j ⁶⁷ 90 % 14 °C; NS; 7 j ² 75 % 10 °C; 10 %; 5 j ⁶⁷ Pas efficace Plusieurs combinaisons température/HR ^{58*, 67}	100 % -1,5 °C (air); 15 h (isolées) ^{12, 58*} -3 °C (air); 5 h (isolées) ou 7 h (groupées) ^{12, 58*} -10 °C (air); 0,5 h (isolées) ou 2 h (groupées) ^{12, 58*} Pas efficace -1,5 °C (air); 48 h (groupées) ^{12, 58*}
Moule zébrée (larves véligères) <i>Dreissena polymorpha</i>	-	Élimination à 90 % NS, 60 lb/po ² , 150 s ⁹¹	-	90 % 27,5 °C; 30-80 %; 65-189 min ³	90 % 17,5 °C; 30-80 %; 100-192 min ³	-
Moule quagga (adultes) <i>Dreissena bugensis</i>	100 % 38 °C; 20 min ⁹ 43 °C; 5 min ⁹ 49 °C; 1 min ⁹ Pas efficace 32 °C; 20 min ⁹	100 % 40 °C; 2 lb/po ² ; 40 s ^{23, 86*} 50 °C; 2 lb/po ² ; 20 s ^{23, 86*} 54 °C; 2 lb/po ² ; 10 s ^{23, 86*} 60 °C; 2 lb/po ² ; 5 s ^{23, 86*} 80 °C; 2 lb/po ² ; 5 s ^{86*} 100 °C; vapeur; 30 s ²⁶ Pas efficace 20 °C ; 2 lb/po ² ; 160 s ²³	Élimination efficace NS ; 3 000 lb/po ² ; 43-48 s ^{86*} NS ; 1 500 lb/po ² ; 37-430 s ^{86*}	100 % 20 °C; 10- 95 %; 3-5 j ⁶⁷ 20 °C; 20-80 %; 3 j ⁴⁸ 30-40 °C; 20-80 %; 1 j ⁴⁸ 99 % 20 °C; 68 %; 45 h ²¹	100 % 10 °C; 95 %; 10-15 j ⁶⁷ 15 °C; 5-95 %; 5-13 j ^{79*} Pas efficace 10 °C; 20-80 %; 5 j ⁴⁸	-

EAE dulcicole	Immersion dans de l'eau chaude (temp.; durée)	Jet d'eau chaude		Séchage à l'air**		Congélation (temp.; durée)
		Basse pression (< 60 lb/po ²)	Haute pression (> 400 lb/po ²)	(≥ 20 °C)	(< 20 °C)	
		(temp.; pression; durée)	(temp.; pression; durée)	(temp.; HR; durée)	(temp.; HR; durée)	
Moule quagga (larves véligères) <i>Dreissena bugensis</i>	100 % 30 °C; > 5 j ²⁰ 35 °C; 20 h ⁷² ; 24 h ^{27*} 37 °C; 1 h ⁷² Pas efficace 5-30 °C; 20 h ⁷² 25 °C; 7 j ⁷² 30 °C; 20 h ⁷² 35-36 °C; 1 h ⁷²	-	-	100 % 30 °C; 95 %; 20 h ⁷² 35-40 °C; > 95 %; 4 h ⁷² Pas efficace 5-30 °C; 95 %; 4 h ⁷²	-	-
Nasse de Nouvelle-Zélande (adultes) <i>Potamopyrgus antipodarum</i>	100 % 45 °C; 1 min ³⁴ 50 °C; ≥ 15 s ³⁴	-	-	99 % 20 °C; 68 %; 44 h ²¹ 21 °C; 90-100 %; 45 h ⁶⁸ 29 °C; 90-100 %; 21 h ⁶⁸ 40 °C; 90-100 %; 1 h ⁶⁸	99 % 9 °C; 20-25 %; 60 h ⁶⁸ 14 °C; 20-25 %; 68 h ⁶⁸ 15 °C; 69 %; 53 h ¹	98 % -8 à -14 °C (air); 4 j ¹⁸
Nasse de Nouvelle-Zélande (juvéniles) <i>Potamopyrgus antipodarum</i>	-	-	-	-	-	-
Petite corbeille d'Asie (adultes) <i>Corbicula fluminea</i>	100 % 41 °C; 40 min ^{56*} 45 °C; 5 min ²⁴	100 % 100 °C; vapeur; 30 s ²⁴	-	100 % 25-30 °C; 80 %; 48 h ⁴⁰ 99 % 20 °C; 68 %; 23 j ²¹ 90 % 20 °C; 80 %; 3,5 j ⁴⁰	90 % 11 °C; 80 %; 8,5 j ⁴⁰ 15 °C; 80 %; 6 j ⁴⁰ Pas efficace 4 °C; 80 %; 10 j ⁴⁰	-
Petite corbeille d'Asie (juvéniles) <i>Corbicula fluminea</i>	-	-	-	-	-	-
ZOOPLANCTON						
Puce d'eau en hameçon et cladocère épineux (adultes) <i>Cercopagis pengoi</i> et <i>Bythotrephes longimanus</i>	100 % 35 °C; > 12 h ³⁸ 38 °C; 20 min ⁹ 43 °C; 5 min ⁹ 49 °C; 1 min ⁹ 50 °C; 2 s ⁶¹ 10 % 32 °C; 20 min ⁹	-	-	99 % 20 °C; NS; 3 h ⁶¹	-	100 % NS; 2 h (jet d'eau et congélation) ³³

EAE dulcicole	Immersion dans de l'eau chaude (temp.; durée)	Jet d'eau chaude		Séchage à l'air**		Congélation (temp.; durée)
		Basse pression (< 60 lb/po ²)	Haute pression (> 400 lb/po ²)	(≥ 20 °C)	(< 20 °C)	
		(temp.; pression; durée)	(temp.; pression; durée)	(temp.; HR; durée)	(temp.; HR; durée)	
Puce d'eau en hameçon et cladocère épineux (œufs) <i>Cercopagis pengoi</i> et <i>Bythotrephes longimanus</i>	100 % 43 °C; 10 min ⁹ 49 °C; 1 min ⁹ 50 °C; 5 min ¹⁵ 50 % 38 °C; 20 min ⁹ Pas efficace 32 °C; 20 min ⁹ 40 °C; 10 min ¹⁵	-	-	-	100 % 17 °C; 45 %; 6 h ¹⁵	100 % -10 à -20 °C (eau); 24 h ¹⁵ Pas efficace -10 à -20 °C (air); 24 h ¹⁵
Crevette rouge sang (adultes) <i>Hemimysis anomala</i>	100 % 45 °C; 15 min ² 60 °C; 5 min ³³	100 % 100 °C; 10-30 s ²⁵	-	100 % 20,8 °C; 60 %; 2-3 h ³³	90 % 14 °C; NS; 1 j ²	-
Crevette rouge sang (œufs) <i>Hemimysis anomala</i>	100 % 60 °C; 5 min ³³	-	-	100 % 20,8 °C; 60 %; 2-3 h ³³	-	-
Crevette tueuse (adultes) <i>Dikerogammarus villosus</i>	100 % 36 °C; 15 min ^{74*} 40 °C; 10 s 45 °C; 15 min ² 50 °C; 30 s	100 % 100 °C; vapeur; >10 s ¹³ 70 % 100 °C; vapeur; 5 s ¹³	100 % 59 °C; 1 600 lb/po ² ; 5 s ¹⁴ 67,4 °C; 1 600 lb/po ² ; 5 s ¹⁴ 75-83 % 55,9 °C; 1 600 lb/po ² ; 5-15 s ¹⁴	-	90 % 14 °C; NS; 9 j ²	-
Crevette tueuse (juvéniles) <i>Dikerogammarus villosus</i>	-	-	-	-	-	-
MACROPHYTES						
Myriophylle à épis <i>Myriophyllum spicatum</i>	100 % 60 °C; > 2 min ¹¹ Efficace 58 °C; 2 s ⁶¹ Pas efficace 45-50 °C; 10 min ¹¹	-	-	100 % 21 °C; HR faible; 13 h ³⁶ 25 °C; 40 %; 3 h ^{6,47} (fragments non spiralés) Plus résistant enroulé ^{17,47} 96 % 21 °C; HR faible; 6 h ³⁶ 87 % 21 °C; HR faible; 3 h ³⁶ Efficace	100 % 19 °C; 75 %; 36 h (tiges simples) ¹⁷ Pas efficace 19 °C; 75 %; 18 h (tiges simples) ¹⁷	-

EAE dulcicole	Immersion dans de l'eau chaude (temp.; durée)	Jet d'eau chaude		Séchage à l'air**		Congélation (temp.; durée)
		Basse pression (< 60 lb/po ²)	Haute pression (> 400 lb/po ²)	(≥ 20 °C)	(< 20 °C)	
		(temp.; pression; durée)	(temp.; pression; durée)	(temp.; HR; durée)	(temp.; HR; durée)	
				20 °C; NS; 3,5 j ⁶¹ Pas efficace 21 °C; 75 %; 140 h (amas enroulés) ¹⁷		
Myriophylle aquatique <i>Myriophyllum aquaticum</i>	100 % 45 °C; 15 min ² 50 °C; 5 min ⁷¹ 55 °C; 1 min ⁷¹ 60 °C; 10 s ⁷¹ 15-40 % 40-45 °C; 15 min ⁷¹	-	-	Pas efficace 25 °C; 40 %; 3 h ⁶	90 % 14 °C; NS; 9 j ²	-
Élodée dense <i>Egeria densa</i>	-	100 % 100 °C; 10 s ²⁸	-	~ 90 % 25 °C; 40 %; 3 h ⁶	-	-
Cabomba de Caroline <i>Cabomba caroliniana</i>	Efficace 60 °C; 2-10 s ⁶¹	-	-	100 % 25 °C; 40 %; 3 h ^{6, 10} 25 °C; 60-90 %; 3,6-9,1 h ¹⁰ 20-30 °C; 60 %; 3,5-3,8 h ¹⁰ Efficace 20 °C; NS; 6,5 j ⁶¹	-	-
Hydrille verticillée <i>Hydrilla verticillata</i>	-		-	97 % 26 °C; NS; 4 h ⁴ Efficace 30 °C; 40 %; >16 h ⁷ Pas efficace 30 °C; 40 %; 16 h ⁷	-	-
Potamot crépu <i>Potamogeton crispus</i>	-	100 % 100 °C; 10 s ²⁸	-	100 % 25 °C; 40 %; 3 h ⁶	100 % 13 °C; 73 %; 24 h (tiges simples) ¹⁷ Pas efficace 13 °C; 73 %; 12 h (tiges simples) ¹⁷ 17 °C; 81 %, 28 j (turions) ¹⁷	-
PARASITES						
Myxobolus cerebralis	100 % : 75 °C; 5 min ^{82, 83}	-	-	100 % 20 °C; NS; 1 h ^{82, 83}	-	100 %

EAE dulcicole	Immersion dans de l'eau chaude	Jet d'eau chaude		Séchage à l'air**		Congélation
		Basse pression (< 60 lb/po ²)	Haute pression (> 400 lb/po ²)	(≥ 20 °C)	(< 20 °C)	
	(temp.; durée)	(temp.; pression; durée)	(temp.; pression; durée)	(temp.; HR; durée)	(temp.; HR; durée)	(temp.; durée)
(adultes : triactinomyxons)						-20 °C; >100 min (eau) ^{82, 83}
<i>Myxobolus cerebralis</i> (juvéniles : myxospores)	100 % 90 °C; 10 min ⁴³ Efficace 60-100 °C; 10 min ⁴⁴ Pas efficace 40 °C; 10 min ⁴⁴	-	-	100 % 22 °C; NS; > 18,5 h ⁴² 18-42 °C (soleil); NS; 105 min ⁴²	-	100 % -20 °C, 7 j (eau) ⁴² , 60 j (eau) ⁴² Pas efficace -20 °C, 18 j (eau) ⁴⁴

¹Alonso et Castro-Diez (2012), ²Anderson *et al.* (2015), ³Banha *et al.* (2016), ⁴Baniszewski *et al.* (2016), ⁶Barnes *et al.* (2013), ⁷Basiouny *et al.* (1978), ⁹Beyer *et al.* (2011), ¹⁰Bickel (2015), ¹¹Blumer *et al.* (2009), ¹²Payne 1992, ¹³Bradbeer *et al.* (2020), ¹⁴Bradbeer *et al.* (2021), ¹⁵Branstrator *et al.* (2013), ¹⁷Bruckerhoff *et al.* (2015), ¹⁸Cheng et LeClair (2011), ²⁰Choi *et al.* (2013), ²¹Collas *et al.* (2014), ²³Comeau *et al.* (2011), ²⁴Coughlan *et al.* (2019), ²⁵Coughlan *et al.* (2020a), ²⁶Coughlan *et al.* (2020b), ²⁷Craft et Myrick (2011), ²⁸Crane *et al.* (2019), ³³De Stasio *et al.* (2019), ³⁴Dwyer *et al.* (2003), ³⁵Elderkin et Klerks (2005), ³⁶Evans *et al.* (2011), ³⁸Garton *et al.* (1990), ⁴⁰Guareschi et Wood (2020), ⁴¹Harrington *et al.* (1997), ⁴²Hedrick *et al.* (2008), ⁴³Hoffman et Markiw (1977), ⁴⁴Hoffman et Putz (1969), ⁴⁷Jerde *et al.* (2012), ⁴⁸Kappel (2012), ⁵⁶Mattice *et al.* (1982), ⁵⁸McMahon *et al.* (1993), ⁶¹Mohit (2021), ⁶²Morse (2009), ⁶⁵Rajagopal *et al.* (2005), ⁶⁷Ricciardi *et al.* (1995), ⁶⁸Richards *et al.* (2004), ⁷⁰Sebire *et al.* (2018), ⁷¹Shannon *et al.* (2018), ⁷²Snider *et al.* (2014), ⁷⁴Stebbing *et al.* (2011), ⁷⁹Ussery et McMahon (1995), ⁸²Wagner *et al.* (2003), ⁸³Wagner (2002), ⁸⁶Wong *et al.* (2014), ⁹¹Davis *et al.* (2016).

Tableau 4. Efficacité des traitements de décontamination chimiques pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée. Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, HR : humidité relative, * : rapports techniques, Δ : expériences en laboratoire d'acclimatation, § désigne des études qui ont utilisé des oxydants chlorés plutôt que de l'hypochlorite de sodium. Tous les traitements étaient des immersions, sauf indication contraire. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.

EAE dulcicole	Hypochlorite de sodium	Acide acétique	CAQ (composés d'ammonium quaternaire)	Sel (NaCl ou KCl)	Virkon ^{MD}
	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)
MOLLUSQUES					
<p>Moule zébrée (adultes) <i>Dreissena polymorpha</i></p>	<p>100 % 0,000025-0,0003 %; 11-45 j⁶⁴ 0,00005-0,00025 %; 5-9 j^{50§} > 0,00005 %; 4 k^{55§} 0,0001 %; 25 j (20 °C)¹³⁹ 0,0002 %; 7 j (21 °C)^{39 §} 0,00025-0,0005 %; 19 j (22 °C)⁵⁴, > 6 j (22 °C)⁵³ 0,00025-0,0008 %; 29 j (12 °C)⁵⁴</p> <p>95 % 0,0005 %; 40 h (30°C)^{41 §}, 1 h (34 °C)^{41§}, 30 min (36 °C)^{41 §} 0,00005-0,00025 %; 19 j (25 °C)⁶⁴, 43 j (10 °C)⁶⁴ 0,00003 %; 14-21 j^{52§*}</p> <p>75 % 0,00005 %; 7 j^{52§*}</p> <p>Pas efficace 0,00005 %; 7 j (21 °C)^{39§} 0,002 %; 30 minⁿ⁵⁵</p>	<p>100 % 5 %; 1 h²⁹ 3,75 %; 2 h²⁹ 1,25-2,5 %; 4 h²⁹</p>	<p>100 % 0,0001-0,0008 % (BULAB 6002); 6-10 j (22 °C)⁵³ 0,00005-0,004 % (BULAB 6009); 4-8 j (22 °C)⁵³</p> <p>0,00003 % (Polyquaternium WSCP); 34 j^{52*} 0,00012 % (Polyquaternium WSCP); 13 j^{52*} 0,00048 % (Polyquaternium WSCP); 8 j^{52*}</p> <p>0,0001 % (CDDA); 24 h^{52*}</p>	<p>100 % KCl 10-30 ppm; > 12 h (15 °C)³¹ <i>KCl 0,1 ppm; 31 j³⁷, > 6 j (15 °C)⁵¹, 5-23 j (19 °C)⁶⁰</i> KCl 0,2 ppm, 10 j (19 °C)⁶⁰</p> <p>NaCl 30 ppm; 24 h^{30, 31} NaCl 50 ppm; 18 j⁷³</p> <p>Efficace NaCl 4 ppm; 5 j^{49Δ}</p> <p>Pas efficace Mélange de KCl + NaCl, 30 ppm; 5 h⁸⁷ Mélange de KCl + NaCl, 30 ppm; 5 h^{87Δ}</p>	<p>100 % 2-4 %; 90 min²⁶</p> <p>> 90 % 2 %; 15-60 min²⁶</p> <p>> 70 % 4 %; 15-60 min²⁶</p>
<p>Moule zébrée (larves véligères) <i>Dreissena polymorpha</i></p>	<p>100 % 0,00005-0,0001 %; 18 h (18-22 °C)⁸⁰ 0,00005 %; 24 h^{52*§}</p> <p>Pas efficace 0,00002-0,00006 %; 0,5-4 h⁸¹</p>	<p>100 % 5 %; > 10 min³²</p>	<p>100 % 0,0004 % (BULAB 6002); 22 j (12 °C)⁵⁴ 0,0001-0,0002 % (BULAB 6002); 29 j (12 °C)⁵⁴</p> <p>Pas efficace 0,00005 %; (BULAB 6002); 29 j (12 °C)⁵⁴</p>	<p>100 % KCl 0,96 ppm, 5-12 h (19 °C)⁶⁰ KCl 10 ppm; 3 h (12 °C)⁸⁴ KCl 2,5 ppm; 24 h (12-17 °C)⁸⁴ KCl 1,25 ppm ; 12 h³¹</p> <p>NaCl 10 ppm; 24 h (15 °C)³¹ NaCl 10 ppm; 6 h (17 °C), 24 h (12 °C)⁸⁴ NaCl 20 ppm; 6 h (17 °C)⁸⁴ Mélange de KCl + NaCl, 14 ppm; 3 h⁸⁷</p>	<p>100 % 0,5-2 %; > 2 min³²</p>

EAE dulcicole	Hypochlorite de sodium	Acide acétique	CAQ (composés d'ammonium quaternaire)	Sel (NaCl ou KCl)	Virkon ^{MD}
	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)
				Mélange de KCl + NaCl, 30 ppm; 2 h ^{87Δ}	
Moule quagga (adultes) <i>Dreissena rostriformis bugensis</i>	-	-	-	100 % 15-21,3 ppm; 70 h ⁴⁵ 33 ppm; 40 h ⁴⁵ NaCl 50 ppm; 18 j ⁷³ Pas efficace Mélange de KCl + NaCl, 30 ppm; 5 h ⁸⁷ Mélange de KCl + NaCl, 30 ppm; 5 h ^{87Δ}	100 % 2 %; 10 min ⁷⁶ , 5 min ⁵⁹ 0,25 %; 15-20 min ⁵⁹ 0,5 %; 10 min ⁵⁹ > 73 % 2 %; 90 min ²⁶ > 56 % 4 %; 90 min ²⁶
Moule quagga (larves véligères) <i>Dreissena bugensis</i>	-	-	100% 0,4 % (Sparquat 256); 10 min ¹⁶	-	100 % 0,25 %; > 15 min ⁷⁶ 0,5 %; 10 min ⁷⁶ 2 %; 5 min ⁷⁶
Nasse de Nouvelle-Zélande (adultes) <i>Potamopyrgus antipodarum</i>	Pas efficace 0,04 % (ou jet); 20 min ³³ 0,3-1 %; 5 min ^{46*} 0,05-0,3 %; 15-90 s ³⁴	-	100 % 0,07 % (HDQ); 5 min ⁷⁷ 0,15 % (formule 409); 5 min ^{46*} 0,3 % (formule 409); 20 min ³³ 0,3 % (formule 409); 10 min ⁶⁹ 0,045-0,24 % (Roccal-D, Hyamine 1622, chlorure de benzalkonium, Stepanquat); 15 min ⁶³ > 0,4 % (Sparquat 256); > 5 min ⁶⁹ Pas efficace 0,15 % (formule 409); 5 min ⁶⁹	-	100 % 2 %; 20 min (ou jet, mais l'immersion est plus efficace) ^{33, 75, 76} 1 %; >15 min ⁷⁶
Nasse de Nouvelle-Zélande (juvéniles) <i>Potamopyrgus antipodarum</i>	Pas efficace 0,04 % (ou jet); 20 min ³³	-	-	-	100 % 2 %; 20 min (ou jet, mais l'immersion est plus efficace) ³³

EAE dulcicole	Hypochlorite de sodium	Acide acétique	CAQ (composés d'ammonium quaternaire)	Sel (NaCl ou KCl)	Virkon ^{MD}	
	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	
Petite corbeille d'Asie (adultes) <i>Corbicula fluminea</i>	100 % 0,0001 %; 6-12 j (température entre 18 et 29 °C) ⁸⁵ 0,00001 %; 26 j ^{86S} 0,00002 %; 13 j ^{86S} 0,000005 %; 36 j ^{86S} 0,00005 %; 28 j (température entre 9 et 39 °C) ^{19S} 60-95 % 0,00005-0,001 %; 28 j (>18 °C) ^{88S} 0,000025 %; 28 j (température entre 20 et 25 °C) ^{88S} 35-90 % 0,001-0,004 %; 2 j ^{78S} 76 % 0,5 %; 1 h ⁵ <53 % 0,00005-0,001 %, 28 j (< 16 °C) ^{88S} Pas efficace 0,25-1 %; 80 min ²⁴ , 30 min ^{56*} 0,00005 %; 28 j (température entre 12 et 19 °C) ^{88S}	-	-	-	Pas efficace 70 ppm; 72 h ²⁴ , 60 min ⁵	> 93 % 2 %; 5 min ⁵ Pas efficace 2-4 %; 80 min ²⁴
Petite corbeille d'Asie (juvéniles) <i>Corbicula fluminea</i>	100 % 0,00005 %; 96-108 h (25-28 °C) (végétaires uniquement) ^{89S} 60-95 % 0,00005-0,001 %; 28 j (> 18 °C) ^{88S} <53 % 0,00005-0,001 %; 28 j (< 16 °C) ^{88S}	-	-	-	-	
ZOOPLANCTON						
Puce d'eau en hameçon et cladocère épineux (adultes)	100 % 0,04 %; 20 min (ou jet) ³³	-	-	100 % 30 ppm; 1 h ⁸⁷ 24 ppm; 4 h ^{87Δ}	100 % 2 % (ou jet, mais l'immersion est plus efficace); 20 min ³³	

EAE dulcicole	Hypochlorite de sodium	Acide acétique	CAQ (composés d'ammonium quaternaire)	Sel (NaCl ou KCl)	Virkon ^{MD}
	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)
<i>Cercopagis pengoi</i> et <i>Bythotrephes longimanus</i>					
Puce d'eau en hameçon et cladocère épineux (œufs) <i>Cercopagis pengoi</i> et <i>Bythotrephes longimanus</i>	100 % 0,04 %; 20 min (ou jet) ³³	-	-	-	100 % 2 % (ou jet, mais l'immersion est plus efficace); 20 min ³³
Crevette rouge sang (adultes) <i>Hemimysis anomala</i>	100 % 0,05 %; 20 min (ou jet) ³³	-	-	100 % 30 ppm; 3 h ⁸⁷ 30 ppm; 5 h ^{87Δ}	100 % 1 % (ou jet); 1 min ²⁵ 2 % (ou jet); 20 min ³³
Crevette rouge sang (œufs) <i>Hemimysis anomala</i>	100 % 0,05 %; 20 min (ou jet) ³³	-	-	-	100 % 2 % (ou jet); 20 min ³³
Crevette tueuse (adultes) <i>Dikerogammarus villosus</i>	100 % 5 %; > 30 s ⁷⁰	-	-	-	100 % 1 %; 2 min ¹³ ; 12 min ⁷⁰ 2 %; 60 s ¹³ ; 2 min; (jet) ¹³ 4 %; 15 s ¹³
Crevette tueuse (juvéniles) <i>Dikerogammarus villosus</i>	Efficace 0,02 %; 15 min ⁷⁰	-	-	-	-
MACROPHYTES					
Myriophylle à épis <i>Myriophyllum spicatum</i>	Pas efficace 0,00005 %; 4 j ^{85§}	-	-	-	-
Myriophylle aquatique <i>Myriophyllum aquaticum</i>	-	-	-	-	-
Élodée dense <i>Egeria densa</i>	-	-	-	-	Pas efficace 2-4 %; 5-30 min ⁹⁰
Cabomba de Caroline <i>Cabomba caroliniana</i>	-	-	-	-	-
Hydrille verticillée <i>Hydrilla verticillata</i>	-	-	-	-	-
Potamogeton crépu <i>Potamogeton crispus</i>	-	-	-	-	-

EAE dulcicole	Hypochlorite de sodium	Acide acétique	CAQ (composés d'ammonium quaternaire)	Sel (NaCl ou KCl)	Virkon ^{MD}
	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée)
PARASITES					
<i>Myxobolus cerebralis</i> (adultes : triactinomyxons)	100 % 0,013 %; 1 min ⁸² 0,0013-0,0262 %, 10 min ^{82, 83} > 97 % 0,0026 %; 1 min ⁸² Efficace > 0,5 %; > 10 min ⁸³ 0,00026 %; 10 min ⁸²	-	-	-	-
<i>Myxobolus cerebralis</i> (juvéniles : myxospores)	100 % > 0,25 %; 15 min ⁴² Efficace 0,16 %; 24 h ⁴⁴ > 0,5 %; > 10 min ⁸³	-	100 % 0,15 % (chlorure d'alkyl(benzyl)diméthylammonium); 10 min ⁴² Efficace 0,02-0,08 % (Roccal-D); 24 h ^{83, 44}	-	-

⁵ Barbour *et al.* (2013), ⁸ Bernhard (1986), ¹³ Bradbeer *et al.* (2020), ¹⁶ Britton et Dingman (2011), ¹⁹ Cherry *et al.* (1986), ²⁴ Coughlan *et al.* (2019), ²⁵ Coughlan *et al.* (2020a), ²⁶ Coughlan *et al.* (2020b), ²⁹ Davis *et al.* (2015a), ³⁰ Davis *et al.* (2015b), ³¹ Davis *et al.* (2018), ³² Davis (2016), ³³ De Stasio *et al.* (2019), ³⁴ Dwyer *et al.* (2003), ³⁷ Fernald et Watson (2014), ³⁹ Greenshields et Ridley (1957), ⁴¹ Harrington *et al.* (1997), ⁴² Hedrick *et al.* (2008), ⁴⁴ Hoffman et Putz (1969), ⁴⁵ Hofius *et al.* (2015), ⁴⁶ Hosea et Finlayson (2005), ⁴⁹ Kilgour *et al.* (1994), ⁵⁰ Klerks et Fraleigh (1991), ⁵¹ Lewis *et al.* (1997), ⁵² McMahon *et al.* (1994), ⁵³ Martin *et al.* (1993a), ⁵⁴ Martin *et al.* (1993b), ⁵⁵ Matisoff *et al.* (1996), ⁵⁶ Mattice *et al.* (1982), ⁵⁹ Moffit *et al.* (2015), ⁶⁰ Moffitt *et al.* (2016), ⁶³ Opligner et Wagner (2011), ⁶⁴ Rajagopal *et al.* (2002), ⁶⁶ Ramsay *et al.* (1988), ⁶⁹ Schisler *et al.* (2008), ⁷⁰ Sebire *et al.* (2018), ⁷³ Spidle *et al.* (1995), ⁷⁵ Stockton et Moffitt (2013), ⁷⁶ Stockton (2011), ⁷⁷ Stout *et al.* (2016), ⁷⁸ Tilly (1976), ⁸⁰ Van Benschoten *et al.* (1993), ⁸¹ Verween *et al.* (2009), ⁸² Wagner *et al.* (2003), ⁸³ Wagner (2002), ⁸⁴ Waller *et al.* (1996), ⁸⁵ Watkins et Hammerschlag (1984), ⁸⁷ Ellis et Maclsaac 2009, ⁸⁸ Doherty *et al.* 1986, ⁸⁹ Goss *et al.* 1979, ⁹⁰ Crane *et al.* 2020, ¹³⁹ Rajagopal *et al.* (2003).

Tableau 5. Efficacité des traitements de décontamination physiques pour les espèces aquatiques envahissantes marines; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée chez les organismes adultes (sauf pour *Mytilus edulis*, espèce pour laquelle les stades d'adulte et de juvénile sont présentés). Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, * : rapports techniques, Δ : expériences de laboratoire d'acclimatation, a : *Mytilus galloprovincialis* et b : *Ciona savignyi*. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.

EAE marine	Eau de mer		Séchage à l'air	Eau douce				Immersion dans de l'eau de mer chaude
	Jet à basse pression (< 60 lb/po ²)	Jet à haute pression ± séchage à l'air (> 400 lb/po ²)		Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air	
	(pression; durée)	(pression; durée)	(durée)	(durée)	(durée)	(durée d'immersion; durée de séchage)	(durée du jet; durée de séchage)	(température; durée)
TUNICIERS COLONIAUX								
Botrylle étoilé <i>Botryllus schlosseri</i>	Pas efficace 40 lb/po ² ; NS ¹⁰¹	Presque à 100 % 700 lb/po ² ; 10 s ¹³⁶ 80 % 700 lb/po ² ; NS ¹⁰¹	100 % 6 h (18-19 °C; HR 92 %) ^{102*} Élimination efficace 24 h-3 j ¹⁰⁶	100 % 24 h ^{142*,153} Presque à 100 % 6 h ^{142*}	Élimination efficace 5 min ¹⁰⁶	100 % 8 h; 1 h ¹⁰⁷	100 % 10 min; 1 h ¹⁰⁷	-
Botrylloïde violet <i>Botrylloides violaceus</i>	Pas efficace 40 lb/po ² ; NS ¹⁰¹	Presque à 100 % 700 lb/po ² ; 10 s ¹³⁶ 80 % 700 lb/po ² ; NS ¹⁰¹	< 100 % 72 h ^{131*} Élimination efficace 24 h-3 j ¹⁰⁶	100 % 18-24 h ^{131*} 24 h ^{142*, 153} Presque à 100 % 6 h ^{142*}	Élimination efficace 5 min ¹⁰⁶	100 % 8 h; 1 h ¹⁰⁷	100 % 10 min; 1 h ¹⁰⁷	-
Didemnum <i>Didemnum vexillum</i>	-	Élimination à 100 % 2 000 lb/po ² ; NS (+ 48 h de séchage à l'air) ^{112*}	Efficace 2 semaines ^{137*} Élimination efficace 24 h-3 j ¹⁰⁶	100 % 4 h ¹³⁴ Pas efficace 10 min ¹⁴⁷	Élimination efficace 5 min ¹⁰⁶	100 % 8 h; 1 h ¹⁰⁷ 87 % 10 min; 24 h ¹¹⁶	100 % 10 min; 1 h ¹⁰⁷	-
Diplosoma <i>Diplosoma listerianum</i>	-	-	Élimination efficace 24 h-3 j ¹⁰⁶	-	Élimination efficace 5 min ¹⁰⁶	100 % 8 h; 1 h ¹⁰⁷	100 % 10 min; 1 h ¹⁰⁷	-

EAE marine	Eau de mer		Séchage à l'air	Eau douce				Immersion dans de l'eau de mer chaude
	Jet à basse pression (< 60 lb/po ²)	Jet à haute pression ± séchage à l'air (> 400 lb/po ²)		Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air	
	(pression; durée)	(pression; durée)		(durée)	(durée)	(durée d'immersion; durée de séchage)	(durée du jet; durée de séchage)	
TUNICIERS SOLITAIRES								
Ascidie jaune <i>Ciona intestinalis</i>	-	Efficace 400-600 lb/po ² ; NS ^{141*}	100 % b24 h ¹²⁵ b8 h (juv.) ¹²⁵ Élimination efficace 3 j ¹⁰⁶	100 % 3 h ^{143*} 12-24 h ^{140*} 98 % 1 h (larves) ¹⁵² 10 % 1 min ¹⁰⁸ Pas efficace 3-6 h ^{140*}	Élimination efficace 5 min ¹⁰⁶	-	-	100 % 40 °C; 60 s ¹⁵⁰ 50 °C; 10,30,60 s ¹⁵⁰ 60 °C; 10,30,60 s ¹⁵⁰ 66 % 40 °C; 10,30 s ¹⁵⁰ 66-100 % 40 °C (eau douce); 1 min ¹⁰⁸ Pas efficace 60 °C; quelques s ^{119*}
Ascidie plissée <i>Styela clava</i>	100 % 50 lb/po ² ; 30 s (vapeur; 100 °C) ^{115*}	-	100 % 24 h (25-27 °C) ¹²⁴ 2 semaines (10 °C) ¹²⁴ Au moins 1 semaine ^{110*} Élimination efficace 24 h-3 j ¹⁰⁶	100 % 3 h ^{144*} Efficace 1 j ^{110*}	Élimination efficace 5 min ¹⁰⁶	-	-	100 % 60 °C; 30, 60 s ¹⁵⁰ 80-90 °C; 4 s ^{115*} 86 % 50 °C; 60 s ¹⁵⁰ 60 °C; 10 s ¹⁵⁰ 70 % 50 °C; 30 s ¹⁵⁰ 40 % 50 °C; 10 s ¹⁵⁰ ~ 12 % 40 °C; 10, 30, 60 s ¹⁵⁰

EAE marine	Eau de mer		Séchage à l'air	Eau douce				Immersion dans de l'eau de mer chaude
	Jet à basse pression (< 60 lb/po ²)	Jet à haute pression ± séchage à l'air (> 400 lb/po ²)		Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air	
	(pression; durée)	(pression; durée)	(durée)	(durée)	(durée)	(durée d'immersion; durée de séchage)	(durée du jet; durée de séchage)	(température; durée)
Ascidie sale <i>Ascidella aspersa</i>	-	-	Élimination efficace 24 h-3 j ¹⁰⁶	-	Élimination efficace 5 min ¹⁰⁶	-	-	-
MOLLUSQUES								
Moule bleue (adultes) <i>Mytilus edulis</i>	100 % 50 lb/po ² ; ≥ 60 s (vapeur ; 100 °C) ¹²⁶	-	100 % 6 h (41 °C) ^{148*} a7 j (20,3 °C) ¹²⁵ 0 % 3 h (20-41 °C) ^{148*}	Pas efficace 24 h ¹⁰⁷	Pas efficace 10 min ¹⁰⁷	-	-	100 % 28-30 °C; 3 j ¹²⁰ 28 °C; 6 j ^{120Δ} 80 % 28 °C; 4 j ^{120Δ} 50 % 28 °C; 3 j ^{120Δ} 6 % 27 °C; 48 h ^{120Δ} Pas efficace 26 °C; 24 h ^{120Δ} 55 °C; 1 min ¹⁰³
Moule bleue (juvéniles)	-	-	^a 100 %	0 % 24-48 h ^{128*}	Pas efficace 10 min ¹⁰⁷	-	-	100 % : 36 °C; 84 min ^{65Δ}

EAE marine	Eau de mer		Séchage à l'air	Eau douce				Immersion dans de l'eau de mer chaude
	Jet à basse pression (< 60 lb/po ²)	Jet à haute pression ± séchage à l'air (> 400 lb/po ²)		Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air	
	(pression; durée)	(pression; durée)	(durée)	(durée)	(durée)	(durée d'immersion; durée de séchage)	(durée du jet; durée de séchage)	(température; durée)
<i>Mytilus edulis</i>			24 h (18,5 °C; HR 95 %) ¹²⁵ *80 % 6 h (18,5 °C; HR 95 %) ¹²⁵ 47,8 % 11 h (27 °C; HR 55,6 %) ¹²⁹	Pas efficace 48 h ¹¹⁷ 24 h ¹⁰⁷				41 °C; 1 min ^{65Δ} 87 % 40 °C; 5 min ^{128*} 76 % 32,6 °C; 6 h ¹²⁹ Pas efficace 30 °C; 10 min ^{128*} 55 °C; 5 s ¹¹⁷
CRABES ET MACROALGUES								
Crabe vert <i>Carcinus maenas</i>	-	-	Presque à 100 % (adultes et juvéniles) 7 j (29 °C) ¹¹⁴ 50 % 60 h (29 °C) ¹¹⁴	-	-	-	-	100 % (juvéniles) 45-55 °C; 1 min ¹⁰³ 55 °C; 5 s ¹⁰³ Pas efficace (juvéniles) 40 °C; 1 min ¹⁰³ 45-50 °C; 5 s ¹⁰³
<i>Codium fragile</i>	-	-	< 100 % 24 h ^{133*} Pas efficace 5 h ¹²⁷	100 % 24 h ^{128*} Pas efficace 6 h ¹²⁷	-	-	-	100 % 50 °C; 30 s ^{128*}
Taxons de macroalgues	Efficace 50 lb/po ² ; 120 s (vapeur ; 100 °C) ¹²⁶	100 % (tous les stades) > 2 000 lb/po ² ; 2 s ¹¹⁷	100 % (tous les stades) 3 j (10 °C; HR 55-85 %) ¹¹⁷ 1 j (20 °C; HR 55-85 %) ¹¹⁷ 6 semaines (20 °C; > HR 95 %) ¹¹⁷ 100 % (plantules) 8 semaines (10 °C; > HR 95 %) ¹¹⁷	100 % 2 j (10 °C) ¹¹⁷ 1 j (20 °C) ¹¹⁷	-	-	-	100 % 35 °C; 10 min ¹¹⁷ 45 °C; 45 s ¹¹⁷ 55 °C; 5 s ¹¹⁷ Efficace 80-85 °C; 3 s ¹³⁵

EAE marine	Eau de mer		Séchage à l'air	Eau douce				Immersion dans de l'eau de mer chaude
	Jet à basse pression (< 60 lb/po ²)	Jet à haute pression ± séchage à l'air (> 400 lb/po ²)		Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air	
	(pression; durée)	(pression; durée)	(durée)	(durée)	(durée)	(durée d'immersion; durée de séchage)	(durée du jet; durée de séchage)	(température; durée)
			Pas efficace (gamétophytes) > 8 semaines (10 °C; > HR 95 %) ¹¹⁷					
Biosalissures	100 % 50 lb/po ² ; 30-300 s (vapeur; 100 °C) ¹²⁶	< 100 % 2 000-3 000 lb/po ² ; 30 s ¹¹³ Élimination à 100 % 2 000 lb/po ² ; NS (+ 48 h de séchage à l'air) ^{112*}	-	-	-	-	-	-

⁶⁵ Rajagopal *et al.* (2005), ¹⁰¹ Arens *et al.* (2011), ^{102*} Bernier *et al.* (MPO, données non publiées), ¹⁰³ Best *et al.* (2014), ¹⁰⁶ Carman *et al.* (2010), ¹⁰⁷ Carman *et al.* (2016), ¹⁰⁸ Carver *et al.* (2003), ^{110*} Coutts et Forrest (2005), ¹¹¹ Coutts et Forrest (2007), ^{112*} Coutts (2006), ¹¹³ Curtis *et al.* (2021), ¹¹⁴ Darbyson *et al.* (2009), ^{115*} Davidson *et al.* (2005), ¹¹⁶ Denny (2008), ¹¹⁷ Forrest et Blakemore (2006), ^{119*} Gill *et al.* (2007), ¹²⁰ Gonzalez et Yevich (1976), ¹²⁴ Hillock et Costello (2013), ¹²⁵ Hopkins *et al.* (2016), ¹²⁶ Joyce *et al.* (2019), ¹²⁷ Kim et Garbary (2007), ^{128*} Landry *et al.* (MPO, données non publiées), ¹²⁹ Leblanc *et al.* (2005), ^{131*} MacNair *et al.* (2006), ^{133*} MacNair (2002), ¹³⁴ McCann *et al.* (2013), ¹³⁵ Mineur *et al.* (2007), ¹³⁶ Paetzold *et al.* (2012), ^{137*} Pannell et Coutts (2007), ^{140*} Ramsay (données non publiées), ^{141*} Ramsay (2014), ^{142*} Ramsay (2015a), ^{143*} Ramsay (2015b), ^{144*} Ramsay (2015c), ¹⁴⁷ Rolheiser *et al.* (2012), ^{148*} Seuront *et al.* (2019), ¹⁵⁰ Sievers *et al.* (2019), ¹⁵² Bourque *et al.* (MPO, données non publiées), ¹⁵³ Dijkstra *et al.* (2008).

Tableau 6. Efficacité des traitements de décontamination chimiques (hypochlorite de sodium et acide acétique) pour les espèces aquatiques envahissantes marines; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée chez les organismes adultes (sauf pour *Mytilus edulis*, espèce pour laquelle les stades d'adulte et de juvénile sont présentés). Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, * : rapports techniques, a : *Botrylloides leachii*, b : végétales et c : acide acétique à 10 %. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.

EAE marine	Hypochlorite de sodium		Acide acétique					
	Immersion	Jet + séchage à l'air	Immersion		Jet	Immersion + séchage à l'air		Jet + séchage à l'air
	(concentration; durée)	(concentration; durée du jet; durée de séchage)	[4-5 %] (durée)	[1-2 %] (concentration; durée)	[4-5 %] (durée)	[4-5 %] (durée d'immersion; durée de séchage)	[2 %] (durée d'immersion; durée de séchage)	[4-5 %] (durée du jet; durée de séchage)
TUNICIERS COLONIAUX								
Botrylle étoilé <i>Botryllus schlosseri</i>	-	Élimination efficace 0,5 %; 5 s; 6 h ¹³⁸ Pas efficace 0,1 %; 5 s; 12 h ¹³⁸	100 % 1 min ¹¹⁸	Pas efficace 4 min ¹¹⁸	-	100 % 5 min; 1 h ¹⁰⁷ 1 min; 24 h ¹¹⁸	100 % 1 min; 24 h ¹¹⁸	Élimination efficace 5 s; 30 min ¹³⁸
Botrylloïde violet <i>Botrylloides violaceus</i>	100 % 0,3 %; 15 s ^{131*}	^a Élimination efficace 1 %; 5 s; 30 min ¹³⁸ Pas efficace (élimination) 0,5 %; 5 s; 12 h ¹³⁸	100 % 15 s ^{131*} ^a 1 min ¹¹⁸	^a Pas efficace 4 min ¹¹⁸	90 % 30 s ^{131*}	100 % 5 min; 1 h ¹⁰⁷ ^a 1 min; 24 h ¹¹⁸	^a 100 % 1 min; 24 h ¹¹⁸	^a Élimination efficace 5 s; 30 min ¹³⁸
Didemnum <i>Didemnum vexillum</i>	100 % 0,5 %; 20 s ¹¹⁶ 0,25 %; 2 min ¹¹⁶ 0,05 %; 10 min ¹³⁴ 50 % 1 %; 5 min ¹⁴⁶ 65 % 1 %; 15 min ¹⁴⁶ 55 % 1 %; 30 min ¹⁴⁶	-	100 % 2 min ¹³⁴ Efficace 30 s ¹⁴⁷ 95 % 10 min ¹¹⁶ 65 % 5 min ¹⁴⁶	45-82 % 1-10 min ¹¹⁶	-	100 % 5 min; 1 h ¹⁰⁷	-	100 % 5 s; 30 min ¹³⁸ 81 % 3 s; 1 h ¹¹⁶

EAE marine	Hypochlorite de sodium		Acide acétique					
	Immersion	Jet + séchage à l'air	Immersion		Jet	Immersion + séchage à l'air		Jet + séchage à l'air
	(concentration; durée)	(concentration; durée du jet; durée de séchage)	[4-5 %] (durée)	[1-2 %] (concentration; durée)	[4-5 %] (durée)	[4-5 %] (durée d'immersion; durée de séchage)	[2 %] (durée d'immersion; durée de séchage)	[4-5 %] (durée du jet; durée de séchage)
Diplosoma <i>Diplosoma listerianum</i>	-	-	-	-	-	100 % 5 min; 1 h ¹⁰⁷	-	-
TUNICIERS SOLITAIRES								
Ascidie jaune <i>Ciona intestinalis</i>	Pas efficace 0,006 %; 20 min ¹⁰⁸	Efficace 1 %; 5 s; 30 min ¹³⁸ Pas efficace (élimination) 0,5 %; 5 s; 12 h ¹³⁸	100 % 4 min ¹¹⁸ 1 min ¹⁰⁸ 10 s ¹⁵⁰ 99-100 % 15 s ^{119*} 95 % 30 s ¹⁰⁸ 70-95 % 5-10 s ¹³⁰	100 % 60 s ¹⁵⁰ 10 s (40 °C) ¹⁵⁰ 66 % 10, 30 s ¹⁵⁰ Pas efficace 4 min ¹¹⁸	10-20 % (NS) ^{119*}	100 % 1 min; 24 h ¹¹⁸ 5 min; 1 h ¹⁰⁷	100 % 1 min; 24 h ¹¹⁸	Élimination efficace 5 s; 30 min ¹³⁸
Ascidie plissée <i>Styela clava</i>	100 % 0,01 %; 12 h ^{110*} 0,02 %; 12 h ^{110*} 0,05 %; 12 h ^{110*}	-	100 % 1 min ^{110*} 99-100 % 15 s ^{115*} 50 % 60 s ¹⁵⁰	100 % 60 s (40 °C) ¹⁵⁰ 5-10 min ^{110*} 50 % 60 s ¹⁵⁰ Pas efficace 1 min ^{110*}	5-60 % NS ^{115*}	-	-	-
Ascidie sale <i>Asciella aspersa</i>	-	-	-	-	-	100 % 5 min; 1 h ¹⁰⁷	-	-

MOLLUSQUES, CRABES ET MACROALGUES								
Moule bleue (adultes) <i>Mytilus edulis</i>	100 % 0,0004 %; 150 h ¹²³ 0,0004 %; 124-150 h ¹²¹ 0,0001 %; 40 j ¹³⁹ 0,000025 %; 62 j ⁶⁴	-	10-15 % 5-10 s (<i>stade NS</i>) ¹³⁰ Pas efficace 5-10 s ¹⁰⁸	-	15 % 15 s ^{119*} Pas efficace 15-30 s ^{131*}	-	-	-
Moule bleue (juvéniles) <i>Mytilus edulis</i>	100 % 0,0004 %; 7 h ¹²³ ^b 0,0001 %; 20 min ¹²² ^b 0,00001 %; 4 h ¹²² ^b 0,000005 %; 5 h ¹²² 16 % 0,00007 % 10 min (véligrès) ^{121, 122}	-	100 % 5 min ¹⁰⁷	-	-	-	-	-
Crabe vert <i>Carcinus maenas</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Codium fragile	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxons de macroalgues	-	-	100 % 1 min ¹¹⁸ Efficace 15 s ^{132*} 12-79 % 15 s ¹⁴⁹	-	-	-	-	Presque à 100 % 5 s; 10 min ¹³⁸
Biosalissures	-	-	100 % 30 s ¹⁰⁵	-	-	-	-	-

⁶⁴ Rajagopal *et al.* (2002), ¹⁰⁵ Cahill *et al.* (2021), ¹⁰⁷ Carman *et al.* (2016), ¹⁰⁸ Carver *et al.* (2003), ^{110*} Coutts et Forrest (2005), ^{115*} Davidson *et al.* (2005), ¹¹⁶ Denny (2008), ¹¹⁸ Forrest *et al.* (2007), ^{119*} Gill *et al.* (2007), ¹²¹ Haque et Kwon (2017), ¹²² Haque *et al.* (2014), ¹²³ Haque *et al.* (2015), ¹³⁰ Locke *et al.* (2009), ^{131*} MacNair *et al.* (2006), ^{132*} MacNair (2009), ¹³⁴ McCann *et al.* (2013), ¹³⁸ Piola *et al.* (2009), ¹³⁹ Rajagopal *et al.* (2003), ¹⁴⁶ Roche *et al.* (2015), ¹⁴⁷ Rolheiser *et al.* (2012), ¹⁴⁹ Sharp *et al.* (2006), ¹⁵⁰ Sievers *et al.* (2019).

Tableau 7. Efficacité des traitements de décontamination chimiques (saumure et chaux hydratée) pour les espèces aquatiques envahissantes marines; « 100 % » signifie une mortalité de 100 % (sauf indication contraire) pour une combinaison de traitements donnée chez les organismes adultes (sauf pour *Mytilus edulis*, espèce pour laquelle les stades d'adulte et de juvénile sont présentés). Par « efficace », nous entendons un traitement ayant fait l'objet d'études où le pourcentage de mortalité a été jugé suffisant, mais n'a pas été quantifié. NS : non spécifié, * : rapports techniques, a : *Botrylloides leachii*. Les références sont indiquées en exposant et toutes les expériences sur le terrain sont en italiques.

EAE marine	Saumure		Chaux hydratée			
	Immersion	Immersion + séchage à l'air	Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air
	(concentration; durée)	(ppm; durée d'immersion; durée de séchage)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée d'immersion; durée de séchage)	(concentration; durée du jet; durée de séchage)
TUNICIERS COLONIAUX						
Botrylle étoilé <i>Botryllus schlosseri</i>	-	100 % 70 ppm; 10 s; 1 h ¹⁰⁷ Élimination efficace 70 ppm; 10 min; 2 h ¹⁰⁶	-	-	-	Efficace 20 %; 5 s; 6 h ¹³⁸
Botrylloïde violet <i>Botrylloides violaceus</i>	Pas efficace 300 ppm; 15 s ^{131*}	100 % 300 ppm; 5 min; 1 h ^{131*} 70 ppm; 10 s; 1 h ¹⁰⁷ < 100 % 300 ppm; 1 min; 1 h ^{131*} Élimination efficace 70 ppm; 10 min; 2 h ¹⁰⁶	Pas efficace 4 %; 15 s ^{131*}	-	80-90 % 4 %; 15 s; 10-15 min ^{131*}	Efficace 20 %; 5 s; 6 h ¹³⁸
Didemnum <i>Didemnum vexillum</i>	100 % 62 ppm; > 4 h ¹³⁴ Pas efficace 40, 50, 70 ppm; 0,5, 1, 5, 10 min ¹⁴⁷	100 % 70 ppm; 10 s; 1 h ¹⁰⁷ Élimination efficace 70 ppm; 10 min; 2 h ¹⁰⁶	99 % 10 %; 2 min ¹¹⁶ 92 % 4 %; 5 min ¹⁴⁷ Élimination entre 85 et 96 % 4 %; 4 min ¹⁵¹ 80 % 5 %; 2 min ¹¹⁶	-	-	-

EAE marine	Saumure		Chaux hydratée			
	Immersion	Immersion + séchage à l'air	Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air
	(concentration; durée)	(ppm; durée d'immersion; durée de séchage)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée d'immersion; durée de séchage)	(concentration; durée du jet; durée de séchage)
Diplosoma <i>Diplosoma listerianum</i>	-	100 % 70 ppm; 10 s; 1 h ¹⁰⁷ Élimination efficace 70 ppm; 10 min; 2 h ¹⁰⁶	-	-	-	-
TUNICIERS SOLITAIRES						
Ascidie jaune <i>Ciona intestinalis</i>	25 % 300 ppm; 8 min ¹⁰⁸ Pas efficace 300 ppm; 30 s ^{119*}	100 % 70 ppm; 10 s; 1 h ¹⁰⁷ Pas efficace 300 ppm; 15 s; 1 h ^{119*}	80 % 4 %; 2 min ^{145*} 70 % 4 %; 8 min ¹⁰⁸ 50-80 % 4 %; 15 s ^{119*}	-	100 % 4 %; 15 s; 20 min ^{119*}	Efficace 20 %; 5 s; 12 h ¹³⁸
Ascidie plissée <i>Styela clava</i>	-	Élimination efficace 70 ppm; 10 min; 2 h ¹⁰⁶	80 % 4 %; 2 min ^{145*}	-	-	Efficace NS; 45 s ^{145*}
Ascidie sale <i>Asciella aspersa</i>	-	100 % 70 ppm; 10 s; 1 h ¹⁰⁷ Élimination efficace 70 ppm; 10 min; 2 h ¹⁰⁶	-	-	-	-
MOLLUSQUES						
Moule bleue (adultes) <i>Mytilus edulis</i>	6-8 % 70 ppm; 10-20 s ^{128*}	0 % 300 ppm; 30 s; 1 h (stade NS) ^{131*}	10-15 % 4 %; 1 min ¹³⁰ 0-2 % 4 %; 15 s ^{119*, 131*}	0 % 4 %; 5 s ¹⁰⁹	-	-
Moule bleue (juvéniles) <i>Mytilus edulis</i>	3-16 % 300 ppm; 10-120 s ^{104*} 6-8 % 70 ppm; 10-20 s ¹⁰⁷ 0-23 % 300 ppm; 15-30 min ^{128*}	> 39 % 300 ppm; 10 min; 24 h ^{131*} 0 % 300 ppm; 30 s; 1 h ¹²⁸	77-78 % 4 %; 15 min ^{128*} 53-71 % 4 %; 30 min ^{128*} 0 % 4 %; 2 min ^{145*}	-	2 % 4 %; 30 s; 1 h ^{128*}	-

EAE marine	Saumure		Chaux hydratée			
	Immersion	Immersion + séchage à l'air	Immersion	Jet	Immersion + séchage à l'air	Jet + séchage à l'air
	(concentration; durée)	(ppm; durée d'immersion; durée de séchage)	(concentration; durée)	(concentration; durée)	(concentration; durée d'immersion; durée de séchage)	(concentration; durée du jet; durée de séchage)
	Pas efficace 300 ppm; 30 s ¹⁴⁹					
CRABE VERT ET MACROALGUES						
Crabe vert <i>Carcinus maenas</i>	-	-	Pas efficace 4 %; 2 min ^{145*}	-	-	-
Codium fragile	100 % 300 ppm; 15 min ^{133*}	100 % 300 ppm; 15 min; 2 h ^{133*} 300 ppm; 10 min; 24 h ^{133*} 300 ppm; 15 min; 1 h ^{128*}	> 90 % 4 %; 5 min ^{133*}		100 % 4 %; 30 s; 1 h ^{128*} 4 %; 1 min; 24 h ^{133*} 4 %; 15 min; 2 h ^{133*}	-
Taxons de macroalgues	Efficace 300 ppm; 15 s ^{132*} 68-96 % 300 ppm; 15 s ¹⁴⁹ Élimination efficace 400 ppm; 30 min ¹³⁵	-	-	-	-	-

^{104*} Bourque et Myrand (2007), ¹⁰⁶ Carman *et al.* (2010), ¹⁰⁷ Carman *et al.* (2016), ¹⁰⁸ Carver *et al.* (2003), ¹⁰⁹ Comeau *et al.* (2017), ¹¹⁶ Denny (2008), ^{119*} Gill *et al.* (2007), ^{128*} Landry *et al.* (MPO, données non publiées), ¹³⁰ Locke *et al.* (2009), ^{131*} MacNair *et al.* (2006), ^{132*} MacNair (2009), ^{133*} MacNair (2002), ¹³⁴ McCann *et al.* (2013), ¹³⁵ Mineur *et al.* (2007), ¹³⁸ Piola *et al.* (2009), ^{145*} Ramsay *et al.* (2014), ¹⁴⁷ Rolheiser *et al.* (2012), ¹⁴⁹ Sharp *et al.* (2006), ¹⁵¹ Switzer *et al.* (2011).

Tableau 8. Traitements de décontamination recommandés pour les embarcations de plaisance et l'équipement au Canada et dans certains États américains pour les espèces aquatiques envahissantes d'eau douce. Basse pression : débit d'un boyau d'arrosage; IDE : programmes d'inspection et de décontamination des embarcations gérés par les provinces et les États; NS : non spécifié. Les références sont indiquées en exposant. Les concentrations de produits dans les protocoles ont été converties en concentrations chimiques au besoin pour permettre des comparaisons avec la littérature scientifique citée dans le tableau 4 (voir les notes ci-après).

Province ou État	Décontamination des embarcations				Décontamination de l'équipement							
	Jet d'eau chaude sous pression				Eau chaude (temp.; durée)	Séchage à l'air (durée)	Congélation (temp.)	Hypochlorite de sodium ¹ (concentr.; durée)	Acide acétique ² (concentr.; durée)	CAQ ³ (concentr.; durée)	Sel (concentr.; durée)	Virkon ^{MD} (concentr.; durée)
	(emplacement)	(pression)	(temp.)	(durée)								
UMPS III ²¹²	Coque	3 000 lb/po ²	60 °C	10 s	-	-	-	-	-	-	-	-
Remorque	Basse	60 °C	10 s									
Moteur	Basse	60 °C	10 s									
Cardan	Basse	60 °C	132 s									
Moteur ⁴	Rinçage	60 °C										
Citernes de ballast	Rinçage	49 °C	130 s									
Viviers pour appâts vivants	Basse/rinçage	49 °C	130 s									
Cale	Basse/rinçage	49 °C	130 s									
C.-B ^{213, 214}	Axé sur UMPS IV, par du personnel IDE qualifié. La pression (basse ou 3 000 lb/po ²), la température (49 ou 60 °C) et la durée (≥ 10, 130 ou 132 s) dépendent des composants de l'embarcation.				Immersion : 60 °C, 10 min Jet : 60 °C, ≥ 10 s	-	48 h	Acide acétique à 5 %; 2 h (rinçage); suivi d'hypochlorite de sodium à 0,5 %; 10 min	-	-	-	
AB ²¹⁵	Axé sur UMPS IV, par du personnel IDE qualifié. La pression (basse ou 3 000 lb/po ²), la température (49 ou 60 °C) et la durée (≥ 10, 130 ou 132 s) dépendent des composants de l'embarcation. <u>Parasite responsable de la maladie du tournis</u> Jet à haute pression (3 000 lb/po ²) d'eau chaude (90 °C, 60 °C pour les moteurs), 10 minutes suivies du CAQ Dustbane QUAT Plus (0,30 %, 10 min).				-	-	-	0,5 %; 15 min	-	<u>Parasite causant la maladie du tournis</u> Traitement à l'eau chaude suivi de Dustbane QUAT Plus, 0,15 %; 10 min (trempage); 0,3 %; 10 min (essuyage/jet).	-	2 % 20 min
SK ²¹⁶	Axé sur UMPS IV, par du personnel IDE qualifié. La pression (basse ou 3 000 lb/po ²), la température (49 ou 60 °C) et la durée (≥ 10, 130 ou 132 s) dépendent des composants de l'embarcation.				-	-	-	-	-	-	-	-
MB ²¹⁷	Par du personnel IDE qualifié.				Immersion :	-	-10 °C; 3 j	0,525 %; 30 min	5 % 60 min	-	10 ppm; 24 h	-

Province ou État	Décontamination des embarcations				Décontamination de l'équipement							
	Jet d'eau chaude sous pression				Eau chaude	Séchage à l'air	Congélation	Hypochlorite de sodium ¹	Acide acétique ²	CAQ ³	Sel	Virkon ^{MD}
	(emplacement)	(pression)	(temp.)	(durée)	(temp.; durée)	(durée)	(temp.)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)
	Rinçage à l'eau chaude à basse pression (40-60 lb/po ²), la température (50 ou 60 °C) et la durée (≥ 10, ou 130 s) dépendent des composants de l'embarcation. En présence d'EAE visibles, faire suivre d'un lavage à haute pression (3 000-3 500 lb/po ² ; température NS).				60 °C; 10 min Jet : 60 °C, ≥ 10 s							
QC ²¹⁸	Bateau, remorque + équipement	2 600 lb/po ² 2 600 lb/po ²	60 °C Froid	10 s 30 s	-	5 j	0 à -9 °C; 24 h ou ≤ 9 °C; 8 h	0,525 %; 10 min	3,75 %; 20 min	-	-	-
ANSTF ²¹⁹	Embarcation + équipement Moteur Pièces intérieures	2 600 lb/po ²	60 °C 60 °C 60 °C	10 s 2 min 2 min	-	5 j	-	-	-	-	35 ppm; 30 min	-
CO ²²⁰	Bateau/ remorque Cardan Intérieur + eau stagnante Moteur ⁴	2 500 lb/po ² Basse Basse	60 °C 60 °C 49 °C 60 °C	NS 45 s 1 min	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ²²¹	Embarcation + équipement	3 000 lb/po ²	60 °C	30 s	-	-	-10 °C; 4 h	5 %; 1 h	5 %; 20 min	-	10 ppm; 24 h	-
MI ²²²	Embarcation + équipement	Haute (NS)	60 °C	10 s	60 °C; 5 min	-	-	0,6 % 10 min	5 %; 10 min	Formule 409 (0,3 %); 10 min	4 ppm; 30 min	2 %; 15-20 min
MN ²²³	Embarcation + équipement Compartiments intérieurs Moteur	2 500 lb/po ² Basse Basse/rinçage	60 °C 49 °C 60 °C	10 s 10 s 3-10 min	-	5 j	-	-	-	-	-	-
UT ²²⁴	Embarcation + équipement	3 000 lb/po ²	60 °C	10 s	-	7-14 j (été-hiver)	Congélation à l'air, 3 j (hiver)	-	-	-	-	-
WA ²²⁵	Embarcation + équipement Matériaux durs non poreux Matériaux poreux Parasite causant la maladie du tournis	Haute (NS)	60 °C 60 °C 60 °C 75 °C	10 s 15 s 5 min 5 min	-	-	0 à -9 °C, 24 h ou ≤ 10 °C, 8 h	-	-	-	-	1 % 10 min ou 2 %; 20 min

Province ou État	Décontamination des embarcations				Décontamination de l'équipement							
	Jet d'eau chaude sous pression				Eau chaude	Séchage à l'air	Congélation	Hypochlorite de sodium ¹	Acide acétique ²	CAQ ³	Sel	Virkon ^{MD}
	(emplacement)	(pression)	(temp.)	(durée)	(temp.; durée)	(durée)	(temp.)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)	(concentr.; durée)
WI ²²⁶	Embarcation + équipement	Haute de préférence, NS	60 °C	NS	60 °C, NS vapeur, NS	5 j	-	0,5 % 10 min	5 %; 10 min	-	-	2 % 20 min

Remarque 1 : L'eau de Javel contient 5 % d'hypochlorite de sodium; une dilution de 100 ml d'eau de Javel dans 1 L d'eau équivaut à 0,525 % d'hypochlorite de sodium; 5 000 ppm équivaut à 0,5 %.

Remarque 2 : Le vinaigre contient 5 % d'acide acétique.

Remarque 3 : Les concentrations de produits (%) ont été converties en concentrations de CAQ (%).

Remarque 4 : Durée nécessaire jusqu'à ce que la température à la sortie du moteur atteigne 60 °C.

²¹² Elwell et Phillips (2021), ²¹³ Gouvernement de la Colombie-Britannique (2020c), ²¹⁴ Gouvernement de la Colombie-Britannique (2020b), ²¹⁵ Gouvernement de l'Alberta 2020, ²¹⁶ Gouvernement de la Saskatchewan (2020), ²¹⁷ Gouvernement du Manitoba (2021a), ²¹⁸ Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2018), ²¹⁹ ANSTF (2013), ²²⁰ Brown et Walters (2021), ²²¹ DiVittorio *et al.* (2012), ²²² Michigan Department of Environmental Quality (2014), ²²³ Minnesota Department of Natural Resources (2017), ²²⁴ Utah Department of Natural Resources (2012), ²²⁵ Washington Department of Fish and Wildlife (2016), ²²⁶ Wisconsin Department of Natural Resources (2020).

Tableau 9. Récapitulatif des traitements de décontamination des embarcations efficaces pour tuer le plus grand nombre d'espèces aquatiques envahissantes d'eau douce ciblées. Les traitements efficaces (mortalité ≥ 99 %) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour la moule zébrée (MZ), la moule quagga (MQ), la petite corbeille d'Asie (PCA), la nasse de Nouvelle-Zélande (NN-Z), la crevette tueuse (CT), la crevette rouge sang (CRS), les cladocères (CL), les macrophytes (MP) et Myxobolus cerebralis, qui cause la maladie du tourmis (MdT). Les niveaux d'incertitude correspondants sont fondés sur la quantité de données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculées pour les traitements inefficaces.

Traitement des embarcations		Incertain faible	Incertain raisonnable	Incertain élevée	Incertain très élevée	Inefficace	Aucune donnée (juvéniles)	Aucune donnée (adultes)
Séchage à l'air ¹	7 j (20 à 35 °C)	MP	MZ, MQ, MdT, NN-Z	PCA, CRS, CL	-	-	PCA, NN-Z, CT, CL, quelques MP	CT, quelques MP
	15 j (10 à 19 °C)	-	MZ, NN-Z	MQ, CRS, CL, MP	PCA, CT	-	MQ, PCA, NN-Z, CT, CRS, quelques MP, MdT	CL, quelques MP, MdT
Congélation	4 j (air, -20 °C)	-	-	MZ, NN-Z, CL ² , MdT ³	-	CL ² (œufs; dans l'air)	MZ, MQ, NN-Z, PCA, CT, CRS, MP	MQ, PCA, CT, CRS, MP
Jet d'eau chaude à haute pression	68 °C, 15 s, 1 600 lb/po ²	-	-	MZ, CT	MQ	-	MZ, MQ, PCA, NN-Z, CT, CRS, CL, MP, MdT	PCA, NN-Z, CRS, CL, MP, MdT
Jet d'eau chaude à basse pression	100 °C (vapeur), 30 s	-	MZ, MQ	PCA, CT, CRS, MP	-	-	MZ, MQ, NN-Z, PCA, CL, CT, CRS, quelques MP, MdT	NN-Z, CL, quelques MP, MdT

¹ Les durées de séchage dépendent de la température et de l'humidité relative.

² La congélation des œufs dans l'air est inefficace, mais la congélation dans l'eau est efficace (œufs et adultes).

³ Aucune donnée sur la congélation dans l'air, mais efficace dans l'eau (les deux stades).

Tableau 10. Récapitulatif des traitements de décontamination de l'équipement efficaces pour tuer le plus grand nombre d'espèces aquatiques envahissantes d'eau douce ciblées. Les traitements efficaces (mortalité ≥ 99 %) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour la moule zébrée (MZ), la moule quagga (MQ), la petite corbeille d'Asie (PCA), l'nasse de Nouvelle-Zélande (NN-Z), la crevette tueuse (CT), la crevette rouge sang (CRS), les cladocères (CL), les macrophytes (MP) et *Myxobolus cerebralis*, qui cause la maladie du tournis (MdT). Les niveaux d'incertitude correspondants sont fondés sur la quantité de données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculées pour les traitements inefficaces.

Traitements de l'équipement		Incertitude faible	Incertitude raisonnable	Incertitude élevée	Incertitude très élevée	Inefficace	Aucune donnée (juvéniles)	Aucune donnée (adultes)
Séchage à l'air ¹	7 j (20 à 35 °C)	MP	MZ, MQ, MdT, NN-Z, MP	PCA, CRS, CL	-	-	PCA, NN-Z, CT, CL, quelques MP	CT, quelques MP
	15 j (10 à 19 °C)	-	MZ, NN-Z	MQ, CRS, CL, MP	PCA, CT	-	MQ, PCA, NN-Z, CT, CRS, quelques MP, MdT	CL, quelques MP, MdT
Immersion dans l'eau chaude	60 °C, 5 min	-	MZ, MQ, CT, CL, MP	PCA, NN-Z, CRS	-	MdT ²	MZ, PCA, NN-Z, CT, quelques MP	Quelques MP
Congélation	4 j (air, -20 °C)	-	-	MZ, NN-Z, CL ³ , MdT ⁴	-	CL ³ (œufs; dans l'air)	MZ, MQ, NN-Z, PCA, CT, CRS, MP	MQ, PCA, CT, CRS, MP
Jet d'eau chaude à haute pression	68 °C, 15 s, 1 600 lb/po ²	-	-	MZ, CT	MQ	-	MZ, MQ, PCA, NN-Z, CT, CRS, CL, MP, MdT	PCA, NN-Z, CRS, CL, MP, MdT
Jet d'eau chaude à basse pression	100 °C (vapeur), 30 s	-	MZ, MQ	PCA, CT, CRS, MP	-	-	MZ, MQ, NN-Z, PCA, CL, CT, CRS, quelques MP, MdT	NN-Z, CL, quelques MP, MdT
Hypochlorite de sodium	0,25 %, 20 min	-	MdT	MZ, CRS, CL	CT	NN-Z, PCA, quelques MP	MQ, quelques MP	MQ, quelques MP
Virkon ^{MD}	4 %, 90 min	-	MZ, NN-Z, CT, CRS	MQ, PCA, CL	-	-	PCA, CT, MP, MdT	MP, MdT
Composés d'ammonium quaternaire	0,4 %, 10 min	-	NN-Z	MZ, MQ, MdT	-	-	PCA, NN-Z, CT, CRS, CL, MP	MQ, PCA, CT, CRS, CL, MP, MdT
Acide acétique	5 %, 1 h	-	-	MZ	-	-	MQ, PCA, NN-Z, CT, CRS, CL, MP, MdT	MQ, PCA, NN-Z, CT, CRS, CL, MP, MdT

¹ Les durées de séchage dépendent de la température et de l'humidité relative.

² Les stades d'adulte et de juvénile de *M. cerebralis* requièrent 75 °C (5 min) et 90 °C (10 min), respectivement.

³ La congélation des œufs dans l'air est inefficace, mais la congélation dans l'eau est efficace (œufs et adultes).

⁴ Aucune donnée sur la congélation dans l'air, mais efficace dans l'eau (les deux stades).

Tableau 11. Récapitulatif des traitements de décontamination des embarcations pour les espèces aquatiques envahissantes marines. Les traitements efficaces (mortalité $\geq 99\%$) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour les tuniciers coloniaux (TC), les tuniciers solitaires (TS), la moule bleue (MB), le crabe vert (CV), *Codium fragile* (CF) et les macroalgues (MA). Les niveaux d'incertitude correspondants sont indiqués et sont fondés sur la quantité de données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculées pour les traitements inefficaces.

Traitement des embarcations		Incertitude faible	Incertitude raisonnable	Incertitude élevée	Incertitude très élevée	Inefficace	Aucune donnée (juvéniles et adultes)
Jet d'eau de mer chaude à basse pression	100 °C (vapeur), 120 s	-	-	TS, MA, MB (adultes)	-	-	TC, CV, CF, MB (juvéniles)
Jet d'eau de mer froide à haute pression suivi d'un séchage à l'air	15 s, 2 000 lb/po ² + 48 h séchage à l'air	-	TC	TS, MA	-	-	MB, CV, CF
Séchage à l'air ¹	7 j	-	TS, CF	TC, CV ² , MB, MA ³	-	-	-

¹ Les durées de séchage dépendent de la température et de l'humidité relative.

² Seulement si entièrement exposé à l'air (29 °C).

³ Efficace seulement après 8 semaines de séchage à l'air pour certains gamétophytes de macroalgues (10 °C; humidité relative à 95 %).

Tableau 12. Récapitulatif des traitements de décontamination de l'équipement pour les espèces aquatiques envahissantes marines. Les traitements efficaces (mortalité $\geq 99\%$) sont fondés sur un examen de la littérature scientifique sur les traitements létaux pour les tuniciers coloniaux (TC), les tuniciers solitaires (TS), la moule bleue (MB), le crabe vert (CV), *Codium fragile* (CF) et les macroalgues (MA). Les niveaux d'incertitude correspondants sont indiqués et sont fondés sur la quantité de données disponibles, leur qualité et leur concordance. « - » désigne les cas où aucune espèce n'a été classée dans une catégorie d'incertitude particulière ou ceux où aucune donnée n'a été trouvée sur l'inefficacité du traitement. Il convient de noter que les niveaux d'incertitude n'ont pas été calculés pour les traitements inefficaces.

Traitements de l'équipement		Incertitude faible	Incertitude raisonnable	Incertitude élevée	Incertitude très élevée	Inefficace	Aucune donnée (juvéniles et adultes)
Immersion dans de l'eau douce	24 h + 1 h (séchage à l'air)	TC	TS	CF, MA	-	MB	CV
Séchage à l'air ¹	7 j	-	TS, CF	TC, CV ² , MB, MA ³	-	-	-
Jet d'eau de mer chaude à basse pression	100 °C (vapeur), 120 s	-	-	TS, MA, MB (adultes)	-	-	TC, CV, CF, MB (juvéniles)
Jet d'eau de mer froide à haute pression + séchage à l'air	15 s, 2 000 lb/po ² + 48 h (séchage à l'air)	-	TC	TS, MA	-	-	MB, CV, CF
Immersion dans de l'eau de mer chaude	60 °C, 30 s	-	MB	TS, CF, MA, CV (juvéniles)	-	-	TC, CV (adultes)
Immersion dans de la saumure + séchage à l'air	300 ppm, 15 min + 2 h (séchage à l'air)	-	TC, TS, MA	CF	-	MB	CV

Traitements de l'équipement		Incertitude faible	Incertitude raisonnable	Incertitude élevée	Incertitude très élevée	Inefficace	Aucune donnée (juvéniles et adultes)
Immersion dans de l'acide acétique	5 %, 10 min	-	TC, TS, MA	MB (juvéniles)	-	MB (adultes)	CV, CF
Immersion dans de l'hydroxyde de calcium + séchage à l'air	4 %, 15 min + 2 h (séchage à l'air)	-	TC	TS, CF	-	MB, CV (adultes)	MA, CV (juvéniles)
Immersion dans de l'hypochlorite de sodium	0,05 %, 6 h	-	TC, TS	MB	-	-	CV, CF, MA

¹ Les durées de séchage dépendent de la température et de l'humidité relative.

² Seulement si entièrement exposé à l'air (29 °C).

³ Efficace seulement après 8 semaines de séchage à l'air pour certains gamétophytes de macroalgues (10 °C; humidité relative à 95 %).

Tableau 13. Récapitulatif des compatibilités/incompatibilités des traitements de décontamination avec divers matériaux (fibre de verre, plastique, métal, tissu, caoutchouc, néoprène et tapis), ainsi que de leurs avantages et inconvénients généraux. Les références sont indiquées en exposant.
* : rapports techniques, NS : non spécifié.

Traitement	Compatibilité	Incompatibilité	Avantages	Inconvénients
Température	<p>Immersion de petits équipements de sports nautiques, de chaussures et de matériel poreux^{2, 71, 205, 225}</p> <p>Pièces extérieures des embarcations, des remorques et de l'équipement^{211, 212}</p> <p>< 50-60 °C : moteurs, compartiments intérieurs, accessoires de coque^{38, 201, 208, 211, 220}</p>	<p>> 50-60 °C : pompes, moteurs, systèmes internes et de refroidissement^{211, 212}</p> <p>Divers matériaux pour embarcations (par exemple, aluminium, plastique, Gore-Tex, peintures, PEHD, acrylique)^{207, 220}</p> <p>> 80 °C : embarcation²²⁰</p>	<p>L'une des méthodes de nettoyage les plus efficaces, les plus écologiques, les plus rapides, les plus économiques et les plus recommandées pour les embarcations et le matériel de pêche^{26, 71, 62, 207, 209, 111}</p> <p>> 60 °C est la méthode la plus acceptée pour le nettoyage des moules envahissantes^{62, 221*}</p> <p>Aucun produit chimique nécessaire si de l'eau chaude est disponible²²⁵</p> <p>Convient à l'eau stagnante dans les compartiments^{211, 220}</p>	<p>Peut dégrader l'équipement de sports nautiques et des pièces des embarcations²</p> <p>Peut provoquer des brûlures et nécessite des mesures de sécurité de l'exploitant^{2, 207, 221*}</p> <p>Coût de l'équipement, pas toujours disponible localement, et la plupart des lave-autos ne peuvent pas atteindre les 60 °C recommandés^{209, 221*, 222}</p> <p>Il peut être difficile de maintenir des températures élevées (> 60 °C) longtemps avec l'équipement de lavage sous tension disponible⁷¹</p>
Lavage sous pression	<p>Basse pression : VFI, ancrs, pagaies, cardans, moteurs, citernes de ballast, compartiments intérieurs, remorques^{201, 208, 211, 212, 220}</p> <p>Haute pression : coque de l'embarcation et surfaces extérieures, remorques, équipement et matériaux non poreux^{211, 212, 219, 220, 225}</p> <p>Quais flottants, quai, ligne d'ancrage, équipement et nettoyage du navire^{112*}</p>	<p>Haute pression : objets pneumatiques, Gore-Tex, néoprène, gilets de sauvetage, VFI, combinaisons étanches/humides/de survie, sacs de sauvetage²⁰², bateaux en bois et équipements délicats tels que les appareils électroniques, le cardan et les joints de colle^{9, 87*, 202, 208, 212}</p>	<p>Solution raisonnablement efficace et économique²⁰⁷</p> <p>Efficace pour éliminer les organismes incrustés et les résidus^{9, 201, 221*}</p> <p>Convient à l'eau stagnante^{211, 220}</p>	<p>Peut être coûteux (achat d'équipement, coûts de l'eau et de l'électricité) et pourrait gaspiller de l'eau s'il n'y a pas de buse à jet éventail^{207, 209, 221*}</p> <p>Méthode exigeante en main-d'œuvre, nécessite des mesures de sécurité de l'exploitant^{207, 221*}</p> <p>Certains types de buses peuvent endommager les bateaux et l'équipement²²⁰</p> <p>Les articles sensibles doivent être décontaminés selon d'autres méthodes^{201, 221*}</p>
Séchage à l'air	Équipement pour bateaux et sports nautiques ^{1, 2, 205}	NS	Méthode simple et peu coûteuse ^{1, 112*, 124, 207, 218, 112*, 124}	Comme les moules sont tolérantes à l'émersion, il se peut que le séchage à

Traitement	Compatibilité	Incompatibilité	Avantages	Inconvénients
	Équipement nécessitant des soins attentifs ²¹⁹ Cale sèche, mouillages et équipement aquacole ¹²⁴		Mortalité pendant le transport terrestre ¹	l'air ne soit pas efficace sur des durées courtes ¹⁰⁶ Les durées d'exposition efficaces dépendent fortement de la température de l'air et de l'humidité relative ^{58*, 61, 67, 114, 117}
Congélation	Petit équipement ²⁰⁵	NS	Applicable en hiver pour l'équipement et les vêtements, et lorsque les températures chaudes ne conviennent pas ²⁰²	
Hypochlorite de sodium (eau de Javel)	NS	Peut endommager l'équipement en caoutchouc, en métal, en tissu et en plastique ^{46, 202, 207, 211, 221*, 222, 226}	Biocide peu coûteux, largement utilisé, qui attaque vigoureusement les cellules vivantes ^{207, 222} Bonne solution de rechange si le matériau ne résiste pas à la chaleur ²⁰²	Peut poser des risques pour la santé ou l'environnement. Nécessite l'utilisation d'un équipement de protection et un stockage approprié ^{207, 224, 226} Nécessite une neutralisation par la suite avec du thiosulfate ^{202, 226} Se détériore avec le temps, l'exposition à la lumière et à la chaleur et le contact avec l'air, les métaux, les ions métalliques et les matériaux organiques ²²⁸ Durée de conservation limitée, utilisation optimale dans les six mois et utilisation de solutions diluées dans les 24 h ²²⁶ Ne pas mélanger avec du vinaigre ²²²
Acide acétique (vinaigre)	Équipement et infrastructures aquacoles ¹⁵⁰	NS	Efficace et rapide ²⁹ Peu coûteux, accessible et facile à appliquer ¹⁵⁰ Faibles impacts environnementaux ¹⁵⁰ Reste stable en présence de matières organiques ^{118, 138}	Ne pas mélanger avec de l'eau de Javel ²²² Rincer soigneusement et prendre des mesures d'auto-protection ²¹⁸ Santé et sécurité des personnes ^{132*} Diluer avec une grande solution aqueuse avant d'éliminer ²¹⁸
Composés d'ammonium	Gore-Tex, néoprène, gilets de sauvetage, VFI, combinaisons étanches/humides/de survie,	Peut causer de la corrosion sur les métaux ^{202, 211, 221*}	Agent de nettoyage courant ²⁰²	Peut poser des risques pour la santé/génotoxiques ou l'environnement ^{206, 207}

Traitement	Compatibilité	Incompatibilité	Avantages	Inconvénients
quaternaire (CAQ)	sacs de sauvetage, cordes ²⁰² N'endommage pas les engins ^{46, 222}	Non recommandé avec les matériaux poreux, les appareils électroniques de terrain et les sondes, les véhicules tout terrain/hors route ²⁰² Ne convient pas pour les pompes, les composants en bois non scellés, les semelles non amovibles (doivent être complètement sèches), les objets pneumatiques, les planchers fermés ²⁰²	Toxicité aiguë sur la plupart des organismes aquatiques, tue rapidement ^{46, 204}	Conséquences potentielles sur des organisations non ciblées ²¹⁰ À utiliser en combinaison avec une autre option de désinfection ²²⁶ La présence de boue réduit l'efficacité ³³ À éliminer dans un drain d'égout ²²⁵
Sel	Non corrosif sur les systèmes de refroidissement moteur ²⁰⁹ Équipement nécessitant des soins attentifs ²¹⁹	Peut causer de la corrosion sur les métaux ^{221*}	Faible coût et faible toxicité ²⁰⁷	Pas une option pratique pour les embarcations ³¹ Pas toujours accessible et une durée d'exposition prolongée peut être nécessaire ²⁰⁷ À utiliser en combinaison avec une autre option de désinfection ²²⁶
Virkon ^{MD}	NS	NS	Non corrosif et biodégradable ²²² Efficace pour les grandes embarcations de plaisance et les systèmes de refroidissement ²⁵	À utiliser dans un endroit bien ventilé, de préférence à l'extérieur. Porter des vêtements de sécurité ²²⁵
Chaux hydratée	Équipement et bouées aquacoles ^{131*}	Toxique pour certaines larves de mollusques à des concentrations non diluées ^{131*}	Écologique en raison de sa faible toxicité et de sa persistance réduite dans l'environnement comparativement aux biocides synthétiques ¹⁰⁸ Se dilue rapidement dans l'eau, n'entraînant que des effets à court terme et à petite échelle sur le pH de l'eau à proximité de l'activité de vaporisation ^{130, 227}	Difficultés associées à la nature insoluble de la poudre de chaux hydratée ¹⁰⁸ Des quantités importantes de chaux non dissoute et des impuretés connexes demeurent dans les solutions de traitement, ce qui entraîne des inexactitudes dans les estimations des concentrations efficaces ¹⁰⁸ La matière non dissoute qui reste dans les solutions de chaux peut bloquer la buse des laveuses à pression, ce qui empêche l'administration efficace des solutions ¹⁰⁸

Traitement	Compatibilité	Incompatibilité	Avantages	Inconvénients
Saumure	Équipement et bouées aquacoles ^{106, 131*}	NS	Facile et sécuritaire à utiliser, écologique et relativement peu coûteux ^{115*}	NS

¹Alonso et Castro-Diez (2012), ²Anderson *et al.* (2011), ⁹Beyer *et al.* (2011), ²³Comeau *et al.* (2011), ²⁵Coughlan *et al.* (2020a), ²⁶Coughlan *et al.* (2020b), ²⁹Davis *et al.* (2015a), ³¹Davis *et al.* (2018), ³³De Stasio *et al.* (2019), ⁴⁶Hosea et Finlayson (2005), ^{58*}McMahon *et al.* (1993), ⁶¹Mohit (2021), ⁶²Morse (2009), ⁶⁷Ricciardi *et al.* (1995), ⁷¹Shannon *et al.* (2018), ^{86*}Wong *et al.* (2014), ¹⁰⁶Carman *et al.* (2010), ^{112*}Coutts (2006), ¹¹⁴Darbyson *et al.* (2009), ^{115*}Davidson *et al.* (2005), ¹¹⁷Forrest et Blakemore (2006), ¹¹⁸Forrest *et al.* (2007), ¹²⁴Hillock et Costello (2013), ¹³⁰Locke *et al.* 2009, ^{131*}MacNair *et al.* (2006), ^{132*}MacNair (2009), ¹³⁸Piola *et al.* (2010), ¹⁴⁷Rolheiser *et al.* (2012), ¹⁵⁰Sievers *et al.* (2019), ²⁰¹Adirondak Park Invasive Plant Program (2014), ²⁰²Alberta Environment and Parks (2017), ²⁰³California Department of Fish and Wildlife (2013), ²⁰⁴Cockman *et al.* (2012), ²⁰⁵Elwell (2010), ²⁰⁶Ferk *et al.* (2007), ²⁰⁷Miller *et al.* (2006), ²⁰⁸Minnesota Department of Natural Resources (2013), ²⁰⁹New York State Department of Environmental Conservation (2015), ²¹⁰Waller *et al.* (1993), ²¹¹Wyoming Game and Fish Department (2016), ²¹²Elwell et Philipps (UMPS IV; 2021), ²¹⁸Ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs (2018), ²¹⁹ANSTF (2013), ²²⁰Brown et Walters (2021), ^{221*}DiVittorio *et al.* (2012), ²²²Michigan Department of Environmental Quality (2014), ²²⁴Utah Department of Natural Resources (2012), ²²⁵Washington Department of Fish and Wildlife (2016), ²²⁶Wisconsin Department of Natural Resources (2020), ²²⁷DFO 2016, ²²⁸Clarkson *et al.* 2001.

Tableau 14. Faisabilité des traitements de décontamination du point de vue pratique, des exigences en matière d'équipement, des risques pour la santé humaine et l'écosystème, ainsi que de l'élimination.

Traitement	Aspect pratique (embarcation, gros équipement)	Aspect pratique (petit équipement)	Équipement spécial requis	Risques pour la santé humaine	Risques pour l'écosystème	Élimination spéciale	Remarques
Séchage à l'air	OUI	OUI	NON	S. O.	S. O.	S. O.	Longue exposition requise; les moules peuvent être tolérantes à l'émersion
Congélation	OUI	OUI	NON	S. O.	S. O.	S. O.	Longue exposition requise; peu pratique
Eau chaude (immersion)	NON	OUI Peut endommager certains matériaux	OUI	Brûlures	NON	NON	-
Jet d'eau chaude sous pression Basse = VFI, ancres, citernes de ballast, compartiments intérieurs, etc. Haute = coques, remorques, etc.	OUI Peut endommager les pompes, les moteurs, les systèmes de refroidissement, les pontons, les joints collés, les appareils électroniques, etc.	OUI Peut endommager certains matériaux	OUI	Brûlures	Utilise beaucoup d'eau	NON	Exige beaucoup de main-d'œuvre
Vapeur	NON	OUI Peut endommager certains matériaux	OUI	Brûlures	S. O.	S. O.	Exige beaucoup de main-d'œuvre : difficile d'atteindre ces températures
Hypochlorite de sodium (immersion)	NON	OUI Peut endommager certains matériaux	NON	Brûlures chimiques	Persistence, organismes non visés, toxiques pour les larves de certains mollusques et crustacés	OUI	Utilisation dans des endroits bien ventilés
Acide acétique (immersion)	NON	OUI Peut endommager certains matériaux	NON	Brûlures chimiques	NON	OUI	Utiliser dans des endroits bien ventilés

Traitement	Aspect pratique (embarcation, gros équipement)	Aspect pratique (petit équipement)	Équipement spécial requis	Risques pour la santé humaine	Risques pour l'écosystème	Élimination spéciale	Remarques
CAQ (immersion)	NON	OUI Peut endommager certains matériaux	OUI	OUI	Persistence, organismes non ciblés	OUI	Problèmes juridiques liés aux désinfectants à large spectre Utiliser dans des endroits bien ventilés
Virkon ^{MD} (immersion)	NON	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	Utiliser dans des endroits bien ventilés
Hydroxyde de calcium (immersion)	NON	OUI	OUI	Brûlures chimiques	Toxique pour certaines larves de mollusques et crustacés lorsqu'elle n'est pas diluée	NON	Insoluble; difficile d'obtenir des concentrations exactes
Saumure (immersion)	NON	OUI	NON	NON	NON	NON	-

ANNEXE 1. TERMES DE RECHERCHE

1	(décontamin* OU « eau chaude » ou vapeur* OU nettoyer* OU désinfecter* OU vaporiser* OU chauffer* OU sécher* OU prévenir* OU immer* OU gérer* OU antisal* OU biosal* OU encrasser OU soleil* OU chaud OU inspect* OU sécher à l'air* OU rin* OU salinité OU pression* OU dessécher* OU exposer* OU contrôler OU éradiquer* OU biosécurité)
2	(envahissant OU non indigène OU allogène OU exotique OU étranger OU propag* OU envah*)
3	(aquatique OU eau douce OU lac* OU étang* OU rivière* OU ruisseau* OU aquaculture OU océan OU mer OU littoral OU « introductions et transferts »)
4	(espèce OU organisme* OU animal* OU végétal* OU invertébré* OU zooplancton OU mollusque* OU bivalve* OU moule* OU crabe OU organisme nuisible OU macrophyte ou algue* ou macroalgue* OU maladie OU parasite)
5	(viabilité OU viable OU mortalité OU mort OU élimination OU survie* OU reprodu* OU dispersion OU « transport terrestre » OU tolérance OU résistance OU létal* OU « température létale supérieure aiguë » OU température OU chaleur OU chaud OU « température maximale critique »)
6	(protocoles OU normes OU lignes directrices OU « lavez, videz, séchez » OU « hygiène nautique » OU « enlevez le bouchon »)
7	1 ET 2 ET 3 ET 4 ET 5 ET 6 ET 7