Les pratiques d'épandage d'engrais et leurs répercussions sur la qualité de l'eau dans le bassin occidental du lac Érié

Février 2018

INTERNATIONAL JOINT COMMISSION • COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE
Canada and the United States Canada et États-Unis

Pour de plus amples renseignements sur la Commission mixte internationale (CMI), voir son site Web : www.ijc.org. On peut également se renseigner auprès de l'un des bureaux de la CMI aux coordonnées suivantes :

Bureau de la Section américaine
2000 L Street NW, Suite 615
Washington, DC 20440
Téléphone : 202-736-9000
Fax : 202-632-2006
commission@washington.ijc.org

Bureau de la Section canadienne
234, av. Laurier Ouest
22e étage
Ottawa ON K1P 6K6
Téléphone : 613-995-2984
Fax : 613-993-5583
commission@ottawa.ijc.org

Bureau régional des Grands Lacs
100, av. Ouellette
8e étage
Windsor ON N9A 6T3
Téléphone : 519-257-6733
Fax : 519-257-6740
OU
P.O. Box 32869
Detroit MI 48232
Téléphone : 313-226-2170 x6733
commission@windsor.ijc.org

This report is also available in English.

On peut citer le présent rapport comme suit : Commission mixte internationale (2018). **Les pratiques d'épandage d'engrais et leurs répercussions sur la qualité de l'eau dans le bassin occidental du lac Érié.**

Février 2018

Version imprimée
ISBN: E95-2/30-2018F
Cat. No.: 978-0-660-24734-2

Version PDF
ISBN: E95-2/30-2018F-PDF
Cat. No.: 978-0-660-24734-2

Pour plus d'information, consultez le site Web de la CMI (IJC.org)
et suivez-nous sur les réseaux sociaux.

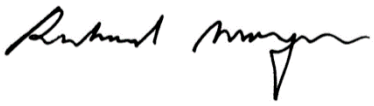
Abonnez-vous à nos bulletins d'information : http://ijc.org/fr_/blog.

COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

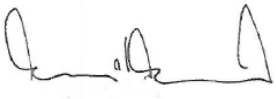
Lana Pollack
Présidente
Section américaine

Gordon Walker
Président
Section canadienne

Rich Moy
Commissaire
Section américaine



Richard Morgan
Commissaire
Section canadienne



Benoît Bouchard
Commissaire
Section canadienne

Remerciements

La Commission mixte internationale tient à exprimer sa reconnaissance pour les inlassables efforts, les précieuses contributions et les excellents conseils du Comité de la priorité scientifique du Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs et du Groupe de travail auquel il a confié ce projet.

Principaux auteurs

J. David Allan, coprésident du Groupe de travail, University of Michigan
Michael W. Murray, coprésident du Groupe de travail, National Wildlife Federation
Avec des contributions de Matthew Child, Commission mixte internationale

Membres du Groupe de travail et réviseurs

Tom Bruulsema, International Plant Nutrition Institute
Patricia Chambers, Environnement et Changement climatique Canada
Anne Cook, The Andersons Incorporated
Irina Creed, Western University
Steve Davis, U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service
Joe DePinto, expert-conseil indépendant
Brad Glasman, Upper Thames River Conservation Authority
Pradeep Goel, Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique (Ontario)
Bob Hecky, University of Minnesota – Duluth
Laura Johnson, Heidelberg University
Pamela Joosse, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Joe Kelpinski, Michigan Department of Agriculture and Rural Development
Kevin King, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service
Andrea Kirkwood, Institut universitaire de technologie de l'Ontario
Rebecca Muenich, Arizona State University
Jeff Ridal, Institut des sciences environnementales du fleuve Saint-Laurent
Clare Robinson, Western University
Craig Stow, National Oceanic and Atmospheric Administration
Chris Winslow, Ohio State University
Santina Wortman, U.S. Environmental Protection Agency
Matthew Child, Commission mixte internationale (Bureau régional des Grands Lacs)
Glenn Benoy, Commission mixte internationale (Section canadienne)
Mark Gabriel, Commission mixte internationale (Section américaine)

Équipe contractuelle (LimnoTech)

John Bratton
Noemi Barabas
Chelsie Boles
Brian Lord
Dan Rucinski
Derek Schlea

Sommaire

Cette évaluation des pratiques d'épandage d'engrais et de leurs répercussions dans le Bassin occidental du lac Érié (BOLE) a été réalisée par les membres du Comité de la priorité scientifique du Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs de la Commission mixte internationale avec le concours d'un groupe consultatif et d'un entrepreneur. Elle porte principalement sur le fumier et les engrais commerciaux (engrais chimiques ou synthétiques) et, accessoirement, sur d'autres matières nutritives appliquées aux terres agricoles.

Les sources agricoles diffuses ou non ponctuelles sont reconnues comme les principales responsables à elles seules des excès de nutriments libérés dans le bassin occidental du lac Érié. Le phosphore (abrégé par son symbole chimique « P ») étant le nutriment limitant la croissance algale dans la plupart des systèmes d'eau douce, l'évaluation s'est essentiellement penchée sur les sources, les transformations et les effets de l'excès de P, bien qu'il y soit brièvement question de l'azote (N) également. Les données sur les ventes d'engrais commerciaux, les taux déclarés d'épandage de ces engrais à la surface et la production totale de fumier en fonction du nombre de têtes de bétail dans les limites du bassin hydrographique ont permis d'évaluer l'importance relative de ces deux sources pour les charges de P. Les sources ponctuelles telles que les eaux usées et les exutoires industriels ainsi que les sources non ponctuelles urbaines et non agricoles n'ont pas été examinées dans le cadre de cette analyse; ces sources sont actuellement considérées relativement mineures (moins de 15 à 25 p. 100 confondues) à l'échelle régionale par rapport à la charge de P agricole non ponctuelle dans l'ouest du lac Érié. L'étendue géographique étudiée couvrait le BOLE de part et d'autre de la frontière, y compris le bassin hydrographique des rivières Sainte-Claire et Détroit.

En plus d'évaluer l'importance relative des apports de P des engrais commerciaux et du fumier, cette étude s'est appuyée sur la documentation existante et les connaissances du groupe consultatif et de l'équipe contractuelle pour mieux comprendre l'incidence passée, actuelle et future du ruissellement agricole non ponctuel sur les charges nutritives entrant dans le BOLE et ses possibilités de causer des conditions eutrophiques et l'apparition épisodique d'efflorescences algales nuisibles (EAN). Cela comprenait un examen des programmes de gestion des terres et des éléments nutritifs, y compris le programme de gérance des nutriments 4B (4R en anglais) récemment adopté; la prise en compte des capacités des programmes de surveillance existants et des modèles de bassins versants pour distinguer les charges de nutriments et les

répercussions des différentes sources d'engrais et des pratiques d'épandage; et l'évaluation de l'état des connaissances concernant la contribution potentielle de chaque type d'engrais aux conditions eutrophiques dans le lac Érié. La démarche a permis de cerner les lacunes dans la couverture spatiale, la résolution temporelle et les connaissances liées aux données, à la modélisation et à la surveillance; de souligner les besoins de recherche continus et émergents; et de définir les problèmes où il importerait d'élaborer des politiques pour apporter les changements nécessaires à l'avenir.

Principales conclusions et recommandations

Cette étude présente de nombreuses conclusions concernant les pratiques agricoles et l'épandage d'engrais (chapitre 2), la surveillance (chapitre 3), la modélisation (chapitre 4) et d'autres facteurs qui méritent considération (chapitre 5). Le chapitre 6 cerne de nombreuses lacunes dans les données et les informations et présente les recommandations du groupe de travail. On trouvera ci-dessous un résumé des principales conclusions et recommandations.

1. Il n'existe pas de méthodes analytiques ou d'évaluation des données établies pour faire la distinction entre les charges de P émanant des engrais commerciaux et celles attribuables au fumier au point de livraison des affluents au lac, et on ne peut établir de lien de causalité entre différentes sources de P appliquées aux champs et la réaction des algues dans le BOLE.

Bien que les recherches récentes utilisant des isotopes stables et des empreintes moléculaires s'avèrent de plus en plus prometteuses pour améliorer notre compréhension des sources d'engrais phosphorés dans le lac, les ventes d'engrais commerciaux, la production de fumier et les informations sur l'épandage doivent être utilisées comme indicateurs de l'incidence relative de chaque principale source d'engrais, sous réserve de préciser que les politiques de confidentialité en vigueur limitent l'accès aux données et aux informations sur les exploitations. De plus, les recherches limitées effectuées à ce jour ne révèlent aucune différence significative dans l'exportation de phosphore (qu'il s'agisse de phosphore réactif dissous [PRD] ou de phosphore total [PT]) provenant des champs recevant du fumier par opposition aux engrais commerciaux. Cela dit, les conclusions de ce rapport, étayées par la documentation existante, ne laissent pratiquement aucun doute sur le fait que les éléments nutritifs perdus dans les terres agricoles sont les principaux responsables des conditions eutrophiques dans le BOLE.

Recommandation : Que l'on poursuive les nouvelles recherches sur la surveillance des sources de phosphore, y compris sur les isotopes stables et les empreintes phosphorées organiques dans le cadre des efforts d'attribution des sources, et la surveillance sur le terrain de la perte de P par les espèces provenant de champs recevant des quantités différentes de fumier et d'engrais commerciaux.

2. Selon les données binationales comparables les plus récentes (2006-2007), on estime que la valeur annuelle des engrais commerciaux épandus et du fumier produit et épandu, confondus et convertis en P élémentaire, s'élève à un total de 41 687 tonnes (72 p. 100) pour le bassin hydrographique des États-Unis et à 16 327 tonnes (28 p. 100) pour celui du côté canadien. Cet écart rejoint celui qui existe entre la superficie des deux bassins, tel qu'illustré par le tableau ES-1 (données de LimnoTech, 2017).

Tel qu'indiqué dans le tableau suivant, les engrais commerciaux sont la principale source de phosphore utilisé à des fins agricoles dans le bassin occidental du lac Érié (BOLE) et aux États-Unis, tandis qu'au Canada, le fumier et les engrais commerciaux sont des sources plus ou moins comparables (52 p. 100 de fumier contre 48 p. 100 d'engrais commerciaux).

Tableau ES-1. Quantité de phosphore produite par l'épandage de fumier et d'engrais commerciaux dans le bassin occidental du lac Érié, 2006-2007.

Pays	P Total (kg)	P Total (kg) (%)	P produit par le fumier (kg)	P produit par le fumier comme % du P Total	P résultant de l'épandage d'engrais commerciaux (kg)	P résultant de l'épandage d'engrais commerciaux comme % du P Total
États-Unis (2007)	41 687 180	72	7 735 580	19	33 951 601	81
Canada (2006)	16 326 671	28	8 443 129	52	7 883 542	48
Total	58 013 851	100	16 178 709	28	41 835 143	72

Les taux actuels d'épandage d'engrais commerciaux sont comparables dans une grande partie du Canada et des États-Unis et ils ont diminué dans l'ensemble du bassin hydrographique depuis les années 1980. Le nombre total d'animaux dans les zones drainant le BOLE est demeuré relativement constant depuis les 30 dernières années, mais on observe une tendance à la hausse des concentrations d'animaux par ferme. Le phosphore du fumier généré est demeuré stable, sans présenter de changements significatifs depuis les années 1980 (bien qu'une analyse ait relevé une augmentation

progressive de la production dans le bassin versant de la rivière Maumee entre le début des années 1990 et 2010) et ses concentrations sont plus élevées en amont des bassins versants de part et d'autre de la frontière. L'information sur les parcs d'engraissement (CAFO) autorisés aux États-Unis est accessible au public (bien qu'elle ne soit pas facilement regroupée), alors que les données concernant les animaux par ferme en Ontario ne le sont généralement pas.

La quantité de phosphore qui pénètre dans les bassins versants par le biais d'autres sources agricoles - y compris les serres, d'autres produits agricoles et les pesticides - est faible et ne contribue probablement pas de façon importante aux charges ou aux répercussions dans le lac Érié, bien qu'elle puisse avoir des effets localisés.

Il y a des limites fondamentales aux estimations des engrais commerciaux et du fumier. Ces limites sont d'ordre temporel et spatial et elles sont principalement attribuables à la structure des programmes (p. ex., recensements agricoles effectués uniquement tous les cinq ans) et aux politiques en vigueur qui restreignent la disponibilité des données concernant les exploitations agricoles.

Recommandation : Que les organismes obtiennent des données (p. ex., des enquêtes, des ensembles de données disponibles et toute nouvelle information) sur les ventes et l'épandage d'engrais commerciaux à une résolution temporelle et spatiale supérieure afin de mieux comprendre cette source importante. Ils devraient en outre évaluer les approches permettant de rendre ces données largement disponibles à la plus haute résolution spatiale possible.

Recommandation : Que l'on quantifie de manière plus probante tous les principaux composants de la production, de la gestion et de l'épandage du fumier sur le terrain ainsi que la perte de phosphore connexe et ses répercussions sur la qualité de l'eau de surface et les écosystèmes à l'échelle locale et régionale.

3. Le P accumulé (résiduel) peut contribuer aux charges fluviales pendant des années ou des décennies, bien que l'on ait constaté une tendance à la baisse de ces accumulations. De nombreuses études indiquent que l'épandage d'engrais phosphatés a dépassé le phosphore éliminé lors des récoltes jusqu'aux années 1980, ce qui a probablement entraîné l'accumulation de phosphore dans les sols des bassins versants. Plus récemment, l'épandage de phosphore dans l'ensemble du bassin est à peu près équilibré par l'élimination du phosphore dans les cultures récoltées, bien qu'il existe une variation locale considérable. Comme le rendement des cultures a généralement

augmenté au cours des dernières décennies, alors que le degré d'épandage d'engrais phosphorés s'est maintenu ou a diminué, cette tendance générale se traduit par un abaissement continu de la teneur en phosphore du sol. Cependant, il suffirait d'une petite « fuite » de P excédentaire pour contribuer à la prolifération d'algues, d'autant plus que les quantités de P ajoutées comme engrais et éliminées lors des récoltes sont importantes par rapport au P exporté des champs.

Le phosphore peut également s'être accumulé jusqu'à saturation dans certains terrains non agricoles (zones tampons, bandes filtrantes, zones humides, zones riveraines, fossés/drains et leurs sédiments, et canaux fluviaux). Étant donné que ces systèmes n'ont pas d'exutoire pour le phosphore par la récolte, on suppose que le phosphore présent dans ces terrains pourrait être en train de passer des réservoirs vers des sources à libération lente. Le rôle et le comportement de P résiduel dans des systèmes de la sorte est un domaine de recherche active, mais c'est aussi un domaine qui échappe aux considérations de gestion et de politique actuelles.

Une réduction plus poussée de l'épandage d'engrais phosphorés, une augmentation de l'élimination du P par la récolte et une meilleure rétention de P sur les terres (grâce à des pratiques de gérance des nutriments telles que les 4B (4R) qui cherchent la formule la plus convenable en termes de source, taux, temps et lieu) pourraient être nécessaires si l'on veut accélérer la diminution du P résiduel et réduire son exportation.

Recommandation : Que les organismes recueillent et mettent à jour régulièrement un ensemble de données binationales statistiquement représentatif des concentrations de phosphore et de la stratification verticale dans les sols agricoles (y compris des protocoles plus cohérents pour les besoins d'échantillonnage), que ce soit dans le cadre d'un programme existant ou nouveau (dirigé par l'organisme ou de nature multipartite).

Recommandation : Que l'on améliore la résolution spatiale des données sur le phosphore résiduel (y compris pour les réservoirs dans des terrains non activement cultivés), ainsi que les liens entre les flux de phosphore provenant des réservoirs et les phénomènes lacustres, dont les efflorescences algales et l'hypoxie.

4. Les systèmes de semis direct contribuent à augmenter l'exportation de phosphore réactif dissous (PRD) des champs.

Soixante-trois pour cent des terres cultivées dans le BOLE suivent un certain type de labour visant la conservation (semis de paillis, semis direct saisonnier ou permanent),

ces pratiques ayant été largement adoptées dans la région à compter des années 1990. L'expansion du labour de conservation au cours des deux dernières décennies coïncide avec l'augmentation des exportations de PRD et elle donc considérée comme un facteur contributif. Le semis direct conduit à l'accumulation de P dans la couche supérieure du sol, ce qui facilite sa libération et peut permettre la formation de macropores servant de voies de transport souterrain à travers les tuyaux de drainage.

De nombreuses études ont trouvé que les champs cultivés par semis direct (sans labour) ont une charge de PRD plus élevée que ceux où l'on a adopté d'autres formes de conservation ou un système de labour conventionnel.

***Recommandation* :** Que l'on soutienne la recherche et la surveillance pour quantifier et mieux comprendre les effets de la pratique agricole du semis direct sur l'accumulation de phosphore à la surface du sol et son transport à travers les tuyaux de drainage et que l'on étudie d'éventuels nouveaux moyens de réduire autant que possible les pertes de phosphore associées à cette pratique.

5. Les tuyaux de drainage souterrains artificiels augmentent le transport de phosphore à travers des voies souterraines.

Les données du milieu des années 2000 indiquent que plus de 50 p. 100 des terres (y compris 86 p. 100 des terres agricoles du bassin versant de la rivière Maumee) sont artificiellement drainées dans la plupart des comtés des États-Unis dans le BOLE et qu'il en est de même pour trois des quatre bassins versants tertiaires de la partie canadienne. D'autres études ont montré que l'écoulement moyen des tuyaux de drainage peut transporter jusqu'à 50 p. 100 des précipitations annuelles. Les données sont toutefois insuffisantes pour pouvoir quantifier les tendances du drainage artificiel dans le BOLE.

Le phosphore transporté par les drains souterrains peut être un contributeur important à la prolifération d'algues. Bien que les charges de phosphore dissous et particulaires provenant des tuyaux de drainage souterrains soient faibles par rapport au P épandu, la prévalence très étendue de ces tuyaux suggère un effet cumulatif important.

***Recommandation* :** Que les organismes obtiennent des données plus récentes sur les réseaux de drainage et leurs effets sur le transport du phosphore, en termes de masse et de forme, ainsi que sur les interactions avec les pratiques agricoles et l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier, et le rôle et le taux relatifs de la libération de P par les tuyaux de drainage par rapport au ruissellement de surface.

6. Les changements climatiques devraient selon toute attente exercer un effet sur l'exportation de P vers le lac.

La charge de phosphore apportée par les rivières au lac Érié est régie à la fois par la concentration et le débit, et comme le débit varie beaucoup plus que la concentration, les années de fortes précipitations et crues sont également des années de charges élevées. Une étude révèle qu'environ un tiers de la charge accrue de PRD de la rivière Maumee depuis 2002 est attribuable à des volumes de ruissellement plus élevés, et les chercheurs ont fait valoir qu'une tendance continue à augmenter le débit fluvial complique considérablement la gestion des éléments nutritifs visant à atteindre les cibles de réduction des charges.

La modélisation indique que l'on risque de perdre une bonne partie des avantages tirés des pratiques de gestion optimales (PGO) et des stratégies connexes dans un climat modéré si les précipitations et le ruissellement augmentent à l'avenir. Des études de modélisation ont montré que des climats plus humides se traduiront par des délais de récupération plus longs, bien que plusieurs études récentes aient également indiqué que le climat futur pourrait avoir des effets atténués sur l'exportation de phosphore.

Les changements climatiques peuvent contribuer à la prolifération d'efflorescences algales nuisibles par d'autres moyens, y compris par des températures de l'eau généralement plus chaudes et des effets sur la stratification des lacs.

Recommandation : Que l'on continue d'évaluer les effets des changements climatiques sur les charges en phosphore des rivières en tant que facteur qui pourrait compliquer la détermination de la charge cible, tout en envisageant les mesures de gestion qui pourraient s'avérer nécessaires pour atteindre les cibles.

7. Le bassin occidental du lac Érié et ses affluents sont parmi les zones les plus intensément surveillées dans le bassin des Grands Lacs bien qu'il y ait certaines insuffisances à combler.

La surveillance des eaux libres du lac et des bassins versants inférieurs est relativement robuste. Il existe de nombreux programmes de surveillance comprenant des paramètres relatifs à la charge de nutriments émanant de sources diffuses et à leurs effets. Les données sont passablement disponibles dans l'ensemble, avec des délais dépassant généralement un an ou plus pour leur publication. Les jauges et les capteurs en temps réel sont de plus en plus répandus dans la région, et la plupart des programmes majeurs font la distinction entre le phosphore total et le phosphore réactif dissous, ce dernier étant considéré comme plus biodisponible. Des lacunes importantes sont

à signaler au niveau de la surveillance dans les bassins versants et le lac en termes d'espace, de temps et de paramètres.

Recommandation : Que l'on conçoive et mette en œuvre un réseau de surveillance à long terme optimisé et intégré pour la qualité de l'eau et les pratiques agricoles à l'appui des décisions concernant les meilleures approches à suivre pour réduire les charges en nutriments.

Recommandation : Que l'on prévoie des mécanismes de financement stables et des intendants institutionnels pour le suivi et la gestion des données binationales de manière durable et à long terme.

8. Les modèles (en particulier l'outil d'évaluation du sol et de l'eau SWAT) fournissent des indications précieuses sur l'efficacité des diverses stratégies de gestion des terres et des éléments nutritifs pour réduire les charges de phosphore. Ils peuvent être d'autant plus utiles pour les besoins d'analyse et de prédiction.

La modélisation a fourni des indications précieuses sur les relations entre les pratiques agricoles et les charges de phosphore, les endroits où les pertes de phosphore sont les plus importantes et les avantages potentiels de diverses pratiques de gestion des terres et des nutriments, y compris les pratiques de gestion utilisées par les agriculteurs. Les résultats suggèrent qu'il faudra adopter un mélange de stratégies pour réduire les charges de P dans le BOLE. Précisons toutefois que l'étendue de la mise en œuvre de la plupart des pratiques de conservation n'est pas toujours modélisée (compte tenu des données limitées sur l'étendue actuelle), ce qui doit entrer en ligne de compte à l'heure de songer aux avantages modélisés d'une mise en œuvre plus étendue.

Recommandation : Que l'on élabore des modèles opérationnels liés à des réseaux de surveillance optimisés et des enquêtes à haute résolution sur les pratiques agricoles changeantes et les caractéristiques des bassins hydrographiques pour mieux pouvoir prévoir les conditions changeantes et éclairer les décisions de gestion adaptative interannuelles et intra-saisonnières.

Recommandation : Que l'on poursuive le soutien financier et politique pour l'élaboration et l'application de modèles de recherche à différentes échelles afin d'améliorer la compréhension des phénomènes et des dynamiques (y compris l'amélioration des tests habituellement menés pour déterminer la teneur en phosphore et d'autres procédés susmentionnés) tout en simulant d'autres scénarios de gestion.

9. La mise en œuvre généralisée d'une combinaison des pratiques de gestion optimales actuelles, l'augmentation de l'évaluation et l'élaboration de nouvelles approches pour relever les défis émergents, dont l'augmentation des exportations de PRD, sont autant d'éléments essentiels au rétablissement du lac Érié.

L'adoption de pratiques de gestion appropriées (p. ex., le programme de gestion des éléments nutritifs 4B) peut avoir une plus grande incidence sur l'exportation de P des terres agricoles que le type d'engrais (commercial ou fumier). L'adoption de pratiques 4B (4R) peut réduire le P disponible et les études en bordure des champs ont également trouvé que ces pratiques ont donné des résultats positifs, bien qu'il faille davantage de recherches sur leur efficacité. Les modèles indiquent que la réduction significative des charges nutritives riveraines provenant des affluents du lac Érié nécessitera de multiples pratiques de conservation, dont la gestion des éléments nutritifs, la réduction de l'épandage d'engrais et diverses pratiques d'aménagement des terres.

Le manque d'informations détaillées sur les pratiques agricoles sur le terrain et au fil du temps limite notre capacité à documenter et à modéliser comme il faut l'épandage des engrais, à évaluer l'efficacité des changements tels que l'adoption croissante des pratiques 4B (4R) et à rendre les modèles plus réalistes sur la façon dont les pratiques influent sur le ruissellement des nutriments. Les enquêtes auprès des agriculteurs, en particulier si le bassin des répondants est suffisamment vaste et représentatif, peuvent aider à cet égard, tout comme des rapports plus précis sur les pratiques locales.

La poursuite de l'expansion et de la mise en œuvre de pratiques de gestion appropriées dépend en définitive de la compréhension et, si possible, de la prise en compte des facteurs socioéconomiques, politiques et culturels de la production agricole et de l'adoption de pratiques de gestion optimales. Bien qu'un examen de ces questions dépasse la portée de ce rapport, les auteurs reconnaissent leur importance et encouragent un examen plus approfondi de ces facteurs à la lumière des résultats scientifiques ci-décrits.

Recommandation : Que l'on continue de promouvoir les lignes directrices 4R pour l'épandage d'engrais, y compris par la sensibilisation, l'éducation et la technologie pour améliorer l'adoption et l'efficacité de ces pratiques. Il faudrait également multiplier les efforts pour évaluer l'efficacité des pratiques de gestion des 4R et des autres pratiques optimales à l'échelle des champs et des bassins versants, et cerner les domaines qu'il y a lieu d'améliorer.

Recommandation : Que l'on soutienne la recherche et la surveillance (bassin hydrographique et lac) pour améliorer la compréhension des processus et établir les options de gestion les plus à même de réduire l'exportation de toutes les formes de P afin que, dans la mesure du possible, ce nutriment reste en place et demeure disponible pour que les cultures puissent l'absorber.

Une vision de l'avenir

Cap sur l'avenir, il faudra probablement concevoir des politiques et des mesures de gestion pour relever les défis décrits dans le présent rapport. Cela peut nécessiter de nouvelles approches pour compenser l'incidence présumée de la gestion des cultures par le semis direct et du drainage artificiel des sols sur le ruissellement du phosphore, notamment la modification des pratiques culturales et de drainage, sans perdre de vue les autres objectifs environnementaux de ces pratiques (p. ex., le contrôle de l'érosion). Il pourrait notamment s'agir de rajuster les charges de phosphore ciblées si la tendance se poursuit et les précipitations et le ruissellement ne font que se multiplier et le climat devient beaucoup plus humide à l'avenir.

Heureusement, un certain nombre de tendances, qui durent depuis plus d'une décennie (selon les dernières données disponibles), sont encourageantes. Les apports d'engrais phosphorés diminuent tandis que l'élimination du phosphore lors des récoltes augmente. Le déclin de P du sol dans au moins quelques endroits suggère que la fertilisation au niveau ou au-dessous des besoins de la culture et le rabattement du P du sol peuvent être atteints sans que ce soit au détriment du rendement des récoltes. Des modèles tels que SWAT donnent un aperçu de la combinaison de pratiques de gestion des terres et des éléments nutritifs qui seront probablement les plus efficaces pour amener les charges fluviales de phosphore à un niveau où les efflorescences algales extrêmes deviendront des phénomènes rares. Ce rapport fournit une évaluation complète des pratiques d'épandage d'engrais dans le BOLE et, en faisant une synthèse de la littérature la plus récente, il décrit les besoins de recherche, les aspects de la gestion des terres et des éléments nutritifs qui exigent de l'attention, et propose des politiques à suivre pour apporter les changements nécessaires.

Les mesures de contrôle du phosphore adoptées dans les années 1970 ont démontré que l'eutrophisation du lac Érié pouvait être inversée par des stratégies axées principalement sur les sources ponctuelles, entraînant des réductions importantes des charges de PT, des concentrations de P dans le lac et de la biomasse algale. Le défi, cette fois-ci, concerne les sources agricoles de nutriments diffuses, qui nécessiteront un

ensemble d’interventions différent. Le lac Érié a bénéficié de mesures audacieuses dans le passé et il lui faut une action tout aussi audacieuse aujourd'hui s’il s’agit de protéger sa santé et de préserver sa valeur pour les futures générations du bassin.

Table des matières

Remerciements 2

Sommaire 3

1. Énoncé des problèmes 17

2. Pratiques agricoles, épandage d'engrais et facteurs contribuant au ruissellement de nutriments dans le bassin occidental du lac Érié 19

2.1 Pratiques et tendances agricoles dans le BOLE 20

2.2. Épandage d'engrais commerciaux 22

2.3. Épandage de fumier 27

2.4. Autres sources de nutriments : serres, herbicides et autres produits 33

2.5. Le rôle de la gestion des nutriments pour le contrôle de leur ruissellement à la suite de l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier 34

2.5.1. Gestion des nutriments et épandage d'engrais commerciaux 35

2.5.2. Gestion des nutriments et épandage du fumier 37

2.6. Aperçu de l'épandage d'engrais commerciaux et de la production de fumier dans le bassin occidental du lac Érié 41

2.7 Récapitulation et données manquantes 41

3. Dans quelle mesure la surveillance sur place et à distance des affluents et des eaux libres permet-elle d'évaluer les apports des diverses sources d'engrais? 45

3.1. Programmes de surveillance des bassins versants et du lac sur place et à distance 45

3.2. Récapitulation et données manquantes 50

4. Dans quelle mesure la modélisation peut-elle servir d'orientation aux décisions de gestion visant la réduction de nutriments? 53

4.1. Modèles de bassins versants 53

4.1.1 SWAT 57

4.1.2 SPARROW 61

4.2. Modèle prévisionnel des efflorescences algales nuisibles dans le bassin occidental du lac Érié 62

4.3 Modèles de bilan massique 63

4.4. Récapitulation et données manquantes 67

5. Quels autres facteurs méritent considération? 69

5.1. Augmentation du PRD dans le ruissellement fluvial 69

5.2 Phosphore résiduel 70

5.3 Des pratiques agricoles qui changent 74
5.3.1 Systèmes de culture au semis direct (sans labour) 74
5.3.2 Tuyaux de drainage 75
5.4. Ratios des nutriments 77
5.5. Changements climatiques 78
5.6 Autres facteurs 80
5.7 Récapitulation et données manquantes 80
6. Conclusions et recommandations 82
6.1 Constatations sur l'épandage d'engrais dans le BOLE 83
6.1.1 Données manquantes et recherches nécessaires sur les engrais 85
6.1.2 Recommandations portant sur l'épandage d'engrais et d'autres pratiques agricoles 86
6.2 Constatations sur la surveillance 87
6.2.1 Données manquantes et recherches nécessaires en matière de surveillance 88
6.2.2 Recommandations portant sur la surveillance 88
6.3 Constatations sur la modélisation 89
6.3.1 Données manquantes et recherches nécessaires en matière de modélisation 89
6.3.2 Recommandations portant sur la modélisation 90
6.4. Des efforts intégrés pour protéger et rétablir le lac Érié 90
7. Sources citées 91
Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique de l'Ontario (MEACC), 2012. Rapport-mémoire technique : Analyse des nutriments et de certains métaux dans les eaux usées (bassins de décantation) (2007-2011) provenant des activités d'exploitation de serres à Leamington (Ontario) (Texte disponible en anglais seulement). 96
Pearce, R., 2011. Drainage statistics reveal some interesting facts about Ontario, Drainage Contractor, le 13 novembre 2011 97

Liste des tableaux

Tableau ES1 : Quantité de phosphore produite par l'épandage de fumier et d'engrais commerciaux dans le bassin occidental du lac Érié, 2006-2007 4
Tableau 2-1 : Teneur en phosphore et azote de divers engrais commerciaux 19
Tableau 2-2 : Teneur en phosphore et azote de divers types de fumier 24
Tableau 2-3 : Quantité de phosphore produite par l'épandage de fumier et d'engrais commerciaux dans le bassin occidental du lac Érié, 2006-2007 35
Tableau 3-1 : Tableau récapitulatif des principaux programmes de surveillance des affluents et des eaux libres du bassin occidental du lac Érié 39
Tableau 4-1 : Tableau comparatif de 11 modèles de bassins versants 46

Liste des figures

Figure 1-1. Zone d'étude 15
Figure 1-2. Schéma illustrant certaines activités humaines et composantes du cycle hydrologique qui ont une incidence sur les charges de nutriments et l'état du lac.....16
Figure 2-1. Tendances d'épandage d'engrais commerciaux phosphorés dans le bassin occidental du lac Érié.....20
Figure 2-2. Tendances de l'intensité d'épandage d'engrais commerciaux phosphorés (kilos par hectare) par bassin versant dans le BOLE.....21
Figure 2-3. Tendances de production de phosphore dérivé du fumier du bétail par bassin versant (kilos par hectare là où la production est normalisée par superficie cultivée) dans le BOLE.....26
Figure 2-4. Tendances relevées dans l'épandage de fumier par superficie (acres) par bassin versant dans le
BOLE.....27
Figure 4-1. Procédés conceptualisés de l'azote (a) et du phosphore (b) dans l'outil SWAT.....50
Figure 4-2. Schéma de bilan massique ou de budget P montrant les intrants et les extrants.....53
Figure 4-3. Sommaire du bilan P au fil du temps pour l'Ontario, le Michigan et l'Ohio.....55
Figure 5-1. Tendance lissée à long terme pour le ratio de concentration du PRD/PT dans la rivière Maumee.....58
Figure 5-2. Échelles temporelles typiques pour la rétention et le recyclage de phosphore (P) dans les bassins et cours d'eau où il s'est déjà accumulé.....61

1. Énoncé des problèmes

L'eutrophisation – soit les niveaux élevés d'éléments nutritifs et les changements écologiques qui en résultent - a ravagé le lac Érié et de nombreux autres plans d'eau pendant des décennies. À la suite d'une importante prolifération des efflorescences algales nuisibles (EAN), d'hypoxie et d'autres effets survenus dans le lac Érié dans les années 1960, de multiples politiques, programmes de réglementation et initiatives non réglementaires ont été mis en place pour régler ces problèmes. La Clean Water Act des États-Unis (assortie du programme de permis pour les sources ponctuelles), des lois et des programmes fédéraux et provinciaux du Canada et des efforts binationaux canado-américains dans le cadre de l'Accord sur la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL) se sont conjugués pour la réduction de certaines charges de nutriments, notamment celles apportées par le ruissellement émanant des stations d'épuration et des sédiments agricoles. Depuis les années 1990, cependant, une recrudescence des symptômes eutrophiques et, en particulier, de la présence et de la gravité croissantes des EAN dans le lac Érié ont rendu urgente la nécessité de comprendre les causes et de déterminer des mesures de gestion efficaces. Comme les charges nutritives demeurent élevées et que les sources agricoles de phosphore (P) dans les engrais commerciaux et le fumier[1] sont largement considérées comme une source importante de ce nutriment dans le lac Érié, il est urgent de mieux comprendre l'incidence des engrais agricoles et d'adopter des stratégies de gestion des éléments nutritifs conçues pour protéger la santé du bassin occidental du lac Érié (BOLE).

Le Comité de la priorité scientifique (CPS) de la Commission mixte internationale (CMI) a été chargé d'explorer cette question en profondeur pour le bassin occidental du lac Érié (BOLE) (figure 1-1). L'objectif principal était d'évaluer l'ampleur et l'importance relative de deux sources d'éléments nutritifs, les engrais commerciaux et le fumier, et l'incidence de la gestion des éléments nutritifs associés à ces sources majeures sur les charges nutritives et leurs effets dans le BOLE. Ce projet s'est efforcé de répondre aux questions suivantes :

- À quel point l'utilisation d'engrais commerciaux et la production et utilisation du fumier sont-elles répandues dans le BOLE? Les données sont-elles suffisantes

[1] Tel qu'utilisé dans ce rapport, « engrais commercial » s'entend de toutes les formes d'engrais chimiques ou synthétiques (y compris les engrais inorganiques et les engrais organiques synthétiques). Le terme « engrais commercial » ne comprend pas le fumier animal vendu dans le BOLE. Le terme « fumier » s'entend de toute forme de fumier (liquide ou solide) produit par le bétail et n'inclut pas d'autres déchets organiques (p. ex., les biosolides provenant des usines de traitement des eaux usées, du compost ou de tout autre matériau). Le terme « engrais » utilisé isolément désigne généralement toute forme de matière inorganique ou organique ajoutée au sol pour augmenter les éléments nutritifs (essentiellement par l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier).

pour comprendre l'importance relative de ces sources pour la livraison de phosphore au bassin?

- Quelle est l'étendue des programmes et des pratiques de gestion optimales (p. ex., programme de gérance des nutriments 4B) dans le BOLE et à quel point sont-ils efficaces pour gérer la perte de phosphore provenant des engrais commerciaux et du fumier qui est emporté par les affluents?
- Quelle est l'étendue des programmes de surveillance existants et ces programmes sont-ils adéquats pour déterminer l'importance relative des engrais commerciaux et du fumier en tant que sources de phosphore dans le BOLE?
- À quel point les modèles existants (en particulier les modèles de bassins versants) peuvent-ils aider à déterminer l'importance relative des engrais commerciaux et du fumier comme contributeurs de phosphore au lac Érié et aussi à évaluer l'efficacité de diverses pratiques de gestion?

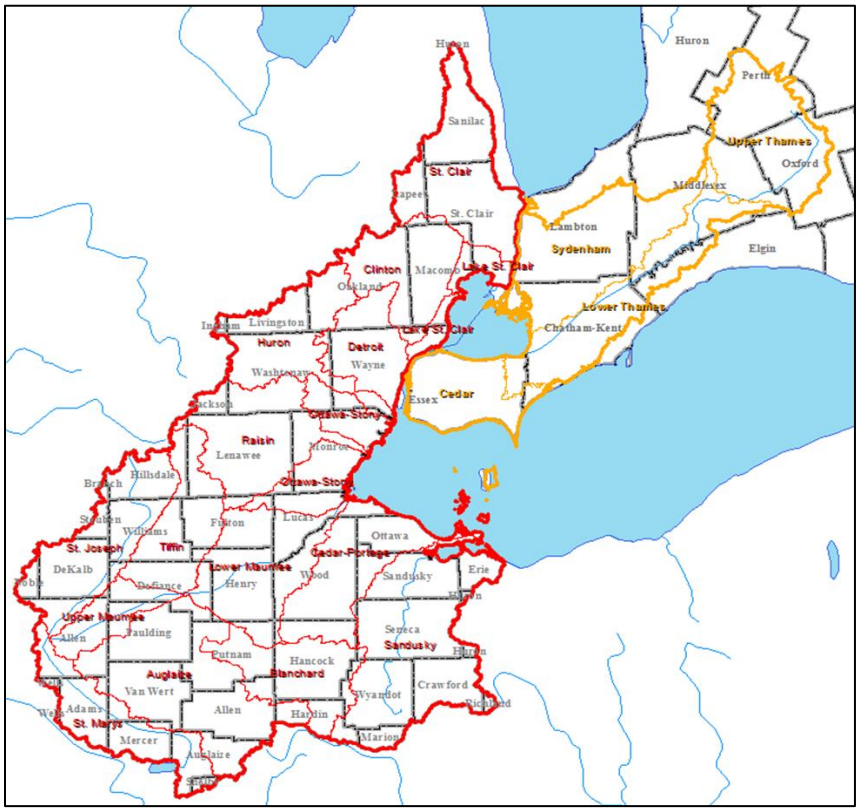


Figure 1-1. Zone d'étude : zone américaine (rouge) = 38 416 km² (14 833 milles carrés), soit 78 p. 100 de la superficie totale; zone canadienne (jaune) = 11 101 km² (4 286 milles carrés), soit 22 p. 100 de la superficie totale du bassin. (LimnoTech, 2017)

Un schéma des processus clés et des approches analytiques pour étudier le problème dans le BOLE est fourni dans la Figure 1-2. Ce rapport résume cet effort global, qui comprenait des réunions d'un groupe de travail, l'élaboration d'un rapport technique

contractuel (LimnoTech, 2017) comprenant plusieurs composantes, y compris l'acquisition de données, la cartographie et la synthèse, ainsi que l'évaluation des programmes et des modèles de surveillance et la préparation du présent rapport.

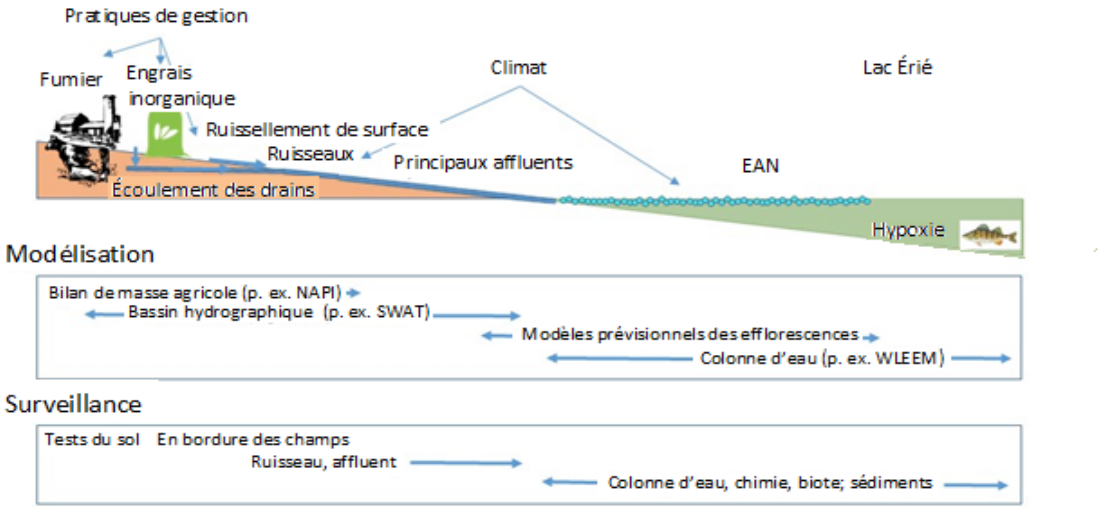


Figure 1-2. Schéma illustrant certaines activités humaines et composantes du cycle hydrologique qui ont une incidence sur les charges de nutriments et l'état du lac. D'autres composantes (p. ex., les apports ponctuels, une évaluation précise du phosphore apporté par les eaux souterraines, un examen détaillé des processus lacustres) ne sont pas entrées dans le cadre de cette évaluation.

2. Pratiques agricoles, épandage d'engrais et facteurs contribuant au ruissellement de nutriments dans le bassin occidental du lac Érié

Le bassin occidental du lac Érié (BOLE) s'étend sur 49 000 km² (19 000 milles carrés) dans des régions de l'Ohio, de l'Indiana, du Michigan et de l'Ontario, avec environ 78 p. 100 du bassin hydrographique dans certaines parties des trois États américains (LimnoTech, 2017). Les parties américaines et canadiennes du bassin sont fortement agricoles, avec des cultures en rangées prédominant de part et d'autre de la frontière et des parcs d'engraissement du bétail à divers endroits, mais souvent regroupés en amont de chaque bassin versant. Les cultures en rangées sont particulièrement importantes dans le bassin de la rivière Maumee, ce qui représente plus des trois quarts de la

superficie du bassin hydrographique (Kalcic et al., 2016). L'importance des pratiques agricoles (en particulier l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier et le ruissellement subséquent) en tant que contributeur majeur à la charge en éléments nutritifs du BOLE est reconnue depuis des années (p. ex., Scavia et al., 2014; Smith et al., 2015a; Watson et al., 2016 - et leurs sources correspondantes).

L'engrais appliqué aux sols agricoles est un déterminant important mais non exclusif des nutriments transportés du paysage vers les plans d'eau. L'engrais est épandu dans les champs pour augmenter le rendement des récoltes, les cultures pouvant pousser plus abondamment que la végétation naturelle précédente qui poussait sur un sol non modifié. Les besoins des cultures varient selon la culture, la souche, la saison de croissance, les conditions météorologiques, la disponibilité de l'eau, la santé des plantes et les types de sol, entre autres facteurs. L'azote, le phosphore et le potassium sont les trois principaux nutriments que fournissent les engrais commerciaux.

Les engrais qui dépassent les besoins annuels et qui ne sont pas conservés dans le paysage (p. ex., en se liant aux particules du sol ou transportés dans les eaux souterraines) peuvent être mobilisés sous forme dissoute ou particulaire et exportés des champs par ruissellement (de surface) ou décharge des drains. Ces nutriments excédentaires sont une combinaison de nutriments nouvellement ajoutés et de nutriments provenant d'années antérieures d'utilisation et de rétention d'engrais. Les engrais appliqués aux terres agricoles peuvent être décrits en termes de quantités, de délais, de méthodes et de types d'engrais choisis pour optimiser les récoltes à court et à long terme. Plusieurs facteurs peuvent potentiellement influencer la quantité de nutriments dans les champs, notamment les types de culture et de labour, les pratiques culturales, le type et la texture du sol, l'inclinaison du terrain, le drainage artificiel, le type d'engrais et son épandage (p. ex., taux, moment choisi pour l'épandage), ainsi que l'hydrologie (p. ex., liés au temps et au climat) (Sharpley et Jarvie, 2012).

2.1 Pratiques et tendances agricoles dans le BOLE

Les cultures en rangées, principalement le maïs et le soja, prédominent des deux côtés du BOLE (plus de 70 p. 100 de toutes les cultures confondues), avec des quantités moindres de blé, de luzerne et de foin, selon les données quinquennales du recensement agricole de chaque pays. La superficie ensemencée pour les deux principales cultures n'a pas beaucoup changé depuis les années 1990, bien que la superficie totale (toutes cultures confondues) ait légèrement diminué entre 1996 et 2011 (LimnoTech, 2017). La stabilité de ces deux caractéristiques agronomiques, que sont l'étendue des terres

cultivées et le type de culture, suggère que ce sont d'autres facteurs qui causent les charges accrues de phosphore réactif dissous (PRD, considéré comme un contributeur important aux efflorescences algales nuisibles) que connaît le lac Érié depuis les deux dernières décennies.

Deux pratiques agricoles clés pertinentes pour l'exportation de phosphore sont l'étendue du drainage artificiel et le labour de conservation du sol (Jarvie et al., 2017). Les drains souterrains artificiels sont un élément important de la production agricole dans les sols mal drainés. Ils sont utilisés pour abaisser la nappe phréatique, améliorant ainsi la survie des plantes grâce à une aération accrue des racines et permettant aux agriculteurs d'avoir accès aux champs. En raison de l'importante étendue des sols argileux dans le BOLE, le drainage artificiel est courant (Kalcic et al., 2016), et bien qu'il existe peu de données pour quantifier les tendances actuelles du drainage dans le bassin, il est évident que ces drains artificiels ont augmenté depuis les dernières décennies.

Les données du milieu des années 2000 indiquent que la plupart des comtés américains du BOLE drainent à l'aide de tuyaux plus de 50 p. 100 des terres (acres), ce taux étant identique pour trois des quatre principaux bassins versants de la partie canadienne du bassin (hectares) (LimnoTech, 2017). En effet, dans l'ensemble, 86 p. 100 des terres agricoles du bassin versant de la rivière Maumee seraient dotées de tuyaux de drainage (LimnoTech, 2017). De plus, l'analyse récente du projet d'évaluation des effets de la conservation (CEAP) du Département américain de l'Agriculture (USDA) révèle que 63 p. 100 des terres cultivées du BOLE ont un certain type de labour de conservation en place (p. ex., l'usage de paillis, la culture saisonnière sans labour ou le semis direct en permanence), pratiques qui ont été amplement adoptées dans la région au début des années 1990, sans qu'il n'y ait eu de changement significatif dans les pratiques de labour entre les enquêtes menées de 2003-2006 et 2012 (USDA NRCS, 2016).

En plus des cultures en rangées, les bassins versants du BOLE comptent d'importantes populations de bétail, en particulier des vaches, des porcs et des poulets. Ceux-ci produisent du fumier qui est une source importante de nutriments et, avec les engrais commerciaux, le sujet principal de ce rapport. Le cheptel est demeuré relativement stable au cours des 30 dernières années dans les zones drainées par le BOLE (LimnoTech, 2017). Du côté canadien, le nombre de porcs et de volailles a progressivement augmenté au cours de ces 30 ans, tandis que le cheptel bovin a diminué graduellement, résultant en un nombre global relativement stable de têtes.

Quant à la partie américaine du bassin, les populations animales totales ont augmenté de 2002 à 2012 pour les bovins, les porcs et les volailles (dans ce dernier cas, les têtes ont été comptées par bassin versant). Le cheptel pour la période 2011-2012 était d'environ 900 000 porcs dans les portions américaine et canadienne, de 375 000 et 170 000 bovins et de 10,8 et 8 millions de poulets/volaille dans les portions américaine et canadienne du BOLE, respectivement[2]. De plus, on observe une tendance à gérer des fermes toujours plus vastes, surtout aux États-Unis, avec la correspondante augmentation du nombre de bovins, de porcs et de volailles (pour chaque groupe) depuis 1987 (LimnoTech, 2017).

2.2. Épandage d'engrais commerciaux

L'épandage d'engrais est un facteur clé à l'heure de déterminer l'ampleur potentielle des éléments nutritifs perdus à partir des sols des bassins versants et entrant dans les affluents du BOLE. Il existe plusieurs types de formulations commerciales d'engrais, y compris ceux contenant les deux principaux macronutriments que sont le phosphore et l'azote. Les plantes assimilent le phosphore sous forme de phosphate (PO_4^{3-}, la forme exacte dépendant du pH du sol), et il existe plusieurs mesures d'hydrosolubilité (ou capacité à dissoudre dans l'eau) du phosphore dans ces engrais, la plupart des engrais commerciaux contenant au moins 50 p. 100 de P soluble dans l'eau (OSU, 2006). Le tableau 2-1 illustre la teneur typique de phosphore et d'azote pour plusieurs types d'engrais phosphatés commerciaux d'usage courant.

Comme les informations sur les ventes sont invariablement du domaine public alors que les données sur l'épandage d'engrais ne le sont pas, ce sont les données sur les ventes au niveau du comté et de l'État ou de la province[3] qui nous permettent de déduire le volume d'épandage des engrais commerciaux dans le BOLE. La figure 2-1 illustre le volume d'épandage d'engrais par trois administrations à partir de la deuxième moitié des années 1980 selon les données du recensement agricole (avec un an de décalage entre les deux pays, 2012 pour les États-Unis et 2011 pour le Canada) et les données additionnelles sur les ventes.

[2] LimnoTech, 2017. À noter que pour les poulets/volailles, les chiffres américains ont été obtenus en suivant la méthode d'estimation par bassin versant.

[3] À l'échelle des comtés (États-Unis seulement : Ruddy et al., 2006; Gronberg et Spahr, 2012); à l échelle provinciale et étatique (Canada, États-Unis : Bruulsema et al., 2011; IPNI-NuGIS 2012)

Tableau 2-1. Teneur en phosphore et azote de divers engrais commerciaux (selon l'OSU, 2017)

Type d'engrais	% P (comme P_2O_5)*	% N
Superphosphate simple	16-20	-
Triple superphosphate	44-48	-
Phosphate de monoammonium (MAP)	48-61	10-12
Phosphate de diammonium (DAP)	46	18
Polyphosphate d'ammonium	34	10

* : Le phosphate est habituellement mesuré comme P_2O_5.

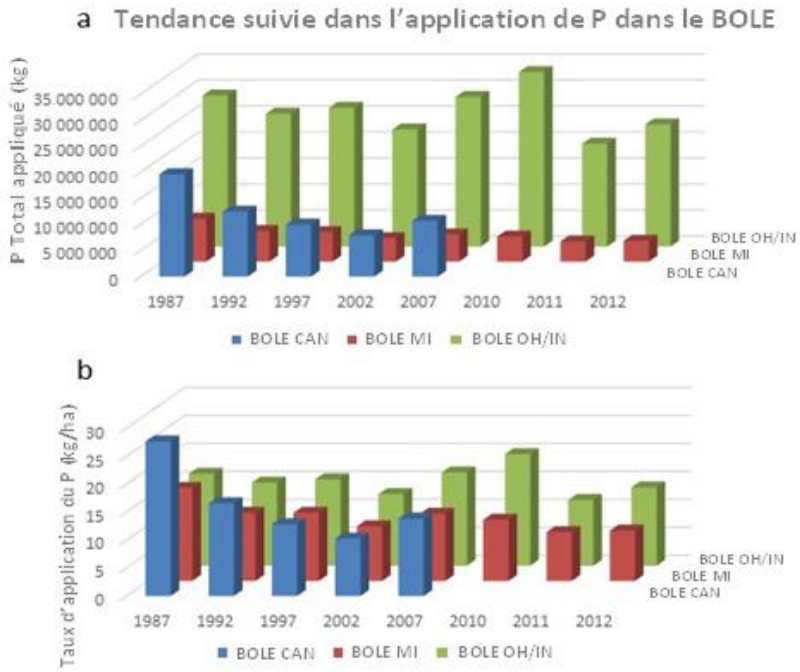


Figure 2-1. Tendances d'épandage d'engrais commerciaux phosphorés dans le bassin occidental du lac Érié. Phosphore total appliqué (en kilos) (panneau a) et taux d'épandage (kilos par hectare) (1 ha = 2,2 acres) (panneau b) des engrais commerciaux dans les portions de l'Ohio, de l'Indiana, du Michigan et dans la portion canadienne du bassin occidental du lac Érié. Les données sont tirées de la base de données IPNI NuGIS et couvrent les années de recensement (1987, 1992, etc. pour les États-Unis et une année de décalage en moins pour le Canada (p. ex., 1986, 1991)) ajoutées de deux années supplémentaires. Les données du recensement de 2011 du Canada n'étaient pas disponibles au moment de la compilation pour ce projet.) (La figure, de LimnoTech, 2017, qui reprend les données présentées dans les annexes du rapport technique, a été légèrement modifiée dans sa version anglaise (lettres-types, abréviation d'hectare) et ensuite adaptée en français.)

L'application de phosphore total (PT) en général montre des quantités plus élevées épandues dans les parties de l'Ohio et de l'Indiana du bassin. Les taux d'épandage (kg ha^{-1}, figure 2-1b) montrent de légères diminutions pour la portion du Michigan, une

tendance à la baisse pour la portion canadienne (malgré une hausse en 2007) et des tendances variables pour la portion de l'Ohio et de l'Indiana.

Il est à noter que les données sur la forme d'engrais ne sont pas saisies dans les recensements; cependant, des données antérieures en Ohio indiquaient un changement progressif au cours des deux dernières décennies vers une plus grande utilisation du phosphate de monoammonium et moins de phosphate de diammonium (ODA, 2013). Dans l'ensemble des États-Unis, de 1995 à 2011, l'utilisation de phosphate de diammonium a diminué de 32 p. 100, tandis que l'utilisation de phosphate de monoammonium a augmenté de 130 p. 100 (USDA, 2017a).

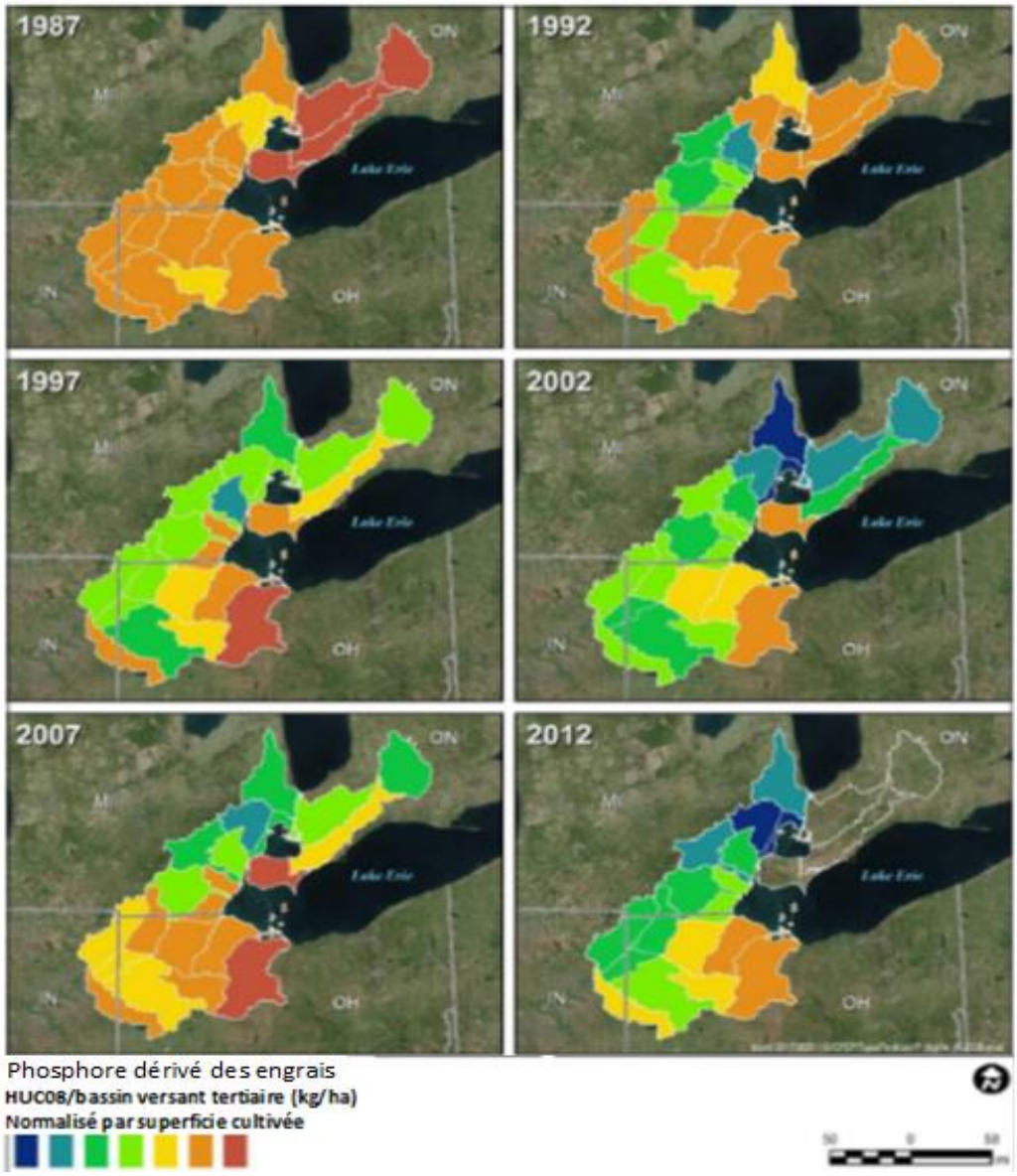


Figure 2-2. Tendances de l'intensité d'épandage d'engrais commerciaux phosphorés (kilos par hectare) par bassin versant dans le BOLE (sans compter les données pour l'Ontario de 2012 qui n'étaient pas disponibles). Les données pour l'Ontario (provenant du recensement agricole au Canada) correspondent à l'année précédente à celle indiquée dans chacune des boîtes (LimnoTech, 2017).

Les données sur le taux d'épandage d'engrais commerciaux (par zone, comme le montre la figure 2-1) sont présentées sous forme de carte à la figure 2-2. Tel qu'illustré, les taux d'épandage sont plus élevés dans les bassins versants de Sandusky, St. Joseph et Cedar-Portage aux États-Unis et plus élevés (en particulier plus récemment) dans les bassins versants de la région d'Essex du côté canadien. Les données révèlent également des tendances temporelles différentes - les taux d'épandage diminuent surtout dans les

bassins versants américains individuels au cours de la période, tandis qu'en Ontario, les taux diminuent généralement jusqu'en 2001 puis augmentent jusqu'en 2006 (selon les données les plus récentes disponibles pour le Canada).

À l'échelle du bassin, les taux moyens d'épandage d'engrais commerciaux dans la portion américaine en 2012 étaient de 11 kg/ha (10 lb/acre) et étaient les plus élevés dans le bassin versant de Sandusky à 19 kg/ha (17 lb/acre) (LimnoTech, 2017). Bien qu'elle ne soit pas directement comparable, l'évaluation du BOLE effectuée par le projet CEAP de l'USDA pour 2012 a fait état d'un taux d'épandage moyen global de 7,4 kg (16,4 lb)/acre (USDA, 2016); précisons qu'il faudrait tenir compte de divers facteurs pour pouvoir comparer les résultats de ces deux évaluations[4]. Dans la portion canadienne, les taux en 2006 (année la plus récente avec les données disponibles au moment de la préparation du rapport technique) étaient en moyenne de 16 kg/ha, le maximum dans les bassins de la région d'Essex étant de 26 kg/ha, soit 23 lb/acre). Dans l'ensemble de la portion américaine du BOLE, la récolte des cultures variait d'environ 11 à 22 kg/ha (10 à 20 lb/acre)[5]. Cette constatation, qui est conforme à la récente évaluation du CEAP (USDA, 2016), et qui est résumée dans le rapport technique (LimnoTech, 2017) et appuyée par d'autres études récentes (p. ex., Bruulsema, 2011 et Han et al., 2012) indique que l'application d'engrais phosphorés dans l'ensemble du bassin est à peu près compensée par l'élimination du phosphore dans les cultures récoltées. Comme les rendements des cultures ont généralement augmenté au cours des dernières décennies, alors que l'épandage d'engrais phosphorés s'est maintenu ou a diminué, cette tendance générale implique un abaissement continu de la teneur en phosphore du sol dans l'ensemble du BOLE. En effet, les concentrations de phosphore dans le sol (une mesure de P disponible pour les cultures, plutôt que la teneur réelle en P des sols) ont montré une fraction généralement décroissante d'échantillons affichant une valeur P supérieure à 50 parties par million (ppm) et une fraction plus élevée à valeur inférieure à 50 ppm dans l'ensemble des comtés des trois États et de l'Ontario[6].

[4] Les facteurs à considérer comprennent diverses méthodologies (p. ex., le recours à des enquêtes dans l'évaluation CEAP par opposition aux données sur les ventes d'engrais que l'on retrouve dans l'évaluation de LimnoTech) et la nécessité d'utiliser des paramètres identiques (p. ex., acres de terres cultivées, etc.); J. Bratton, communication personnelle.

[5] Suivant les données de IPNI-NuGIS, 2012.

[6] Bruulsema, 2016, repris dans LimnoTech, 2017.

2.3. Épandage de fumier

L'épandage de fumier animal est une pratique de longue date dans l'agriculture, car elle fournit de la matière organique pour améliorer la santé du sol et le recyclage des nutriments. Or, des méthodes d'épandage inadéquates peuvent conduire à un transport excessif de nutriments de matière organique et d'autres constituants dans les eaux de surface et souterraines. Dans le bassin occidental du lac Érié (BOLE), les bovins, les porcs et les volailles sont les principales exploitations d'élevage. Comme nous l'avons déjà mentionné, le cheptel est demeuré relativement stable au cours des 30 dernières années dans le BOLE, bien qu'il y ait quelques différences entre les parties américaines et la portion canadienne du bassin et que l'on dénote un regroupement plus intense (exploitations plus vastes), surtout du côté américain. L'approche réglementaire pour les activités d'alimentation animale diffère dans les deux pays. Aux États-Unis, les parcs d'engraissement du bétail (CAFO) d'une certaine taille sont réglementés en vertu de la Clean Water Act, la mise en œuvre étant généralement effectuée par des organismes étatiques. Dans la partie canadienne du bassin, les exploitations d'élevage intensif sont réglementées par des organismes de l'Ontario (ministère de l'Agriculture et des Affaires rurales et ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique).

La quantité et les caractéristiques du fumier produit par le bétail varient en fonction de plusieurs facteurs, notamment les espèces, l'âge et la productivité de chaque animal, ainsi que la concentration et la digestibilité des aliments qu'il consomme (OSU, 2006). La teneur typique en phosphore et en azote des fumiers animaux est indiquée au tableau 2-2. Les données montrent la vaste gamme possible de P et de N dans un groupe d'animaux, bien que certains modèles généraux, y compris la teneur en P généralement plus élevée et des ratios N:P (non illustrés) généralement moins élevés pour le fumier de volaille. Le phosphore dans le fumier peut se présenter sous forme inorganique (c'est-à-dire sous forme de phosphates) et sous forme organique, bien que la plus grande partie du phosphore soit disponible pour les plantes après l'épandage sur les terres cultivées (Eghball et al., 2002). Il sera plus amplement question des problèmes de disponibilité du phosphore dans le fumier ci-dessous et au chapitre 5.

Tableau 2-2. Teneur en phosphore et azote de divers types de fumier (selon l'OSU, 2005)

Type de fumier	% P (comme P_2O_5)*		% N*	
	Moyenne	Étendue	Moyenne	Étendue
Vaches laitières	1,8	0,7 – 5,2	4,3	2,2 – 14,3
Porcs**	4,3	1,4 – 6,8	14,0	2,7 – 24,2
Volaille***	7,0	1,6 – 17,9	3,9	2,3 – 5,6

* : Pourcentages à sec; ** : Fini; *** : Couches

Les quantités de fumier pour les États-Unis ont été tirées de la base de données IPNI NuGIS, qui comprend des estimations basées sur le nombre de têtes signalées dans les données du recensement et les taux d'excrétion déclarés pour différents animaux (LimnoTech, 2017). Les données pour la partie canadienne du BOLE ont été tirées d'un ensemble de données du SIG canadien (LimnoTech, 2017). Tout comme pour les populations animales totales discutées ci-dessus, la production de fumier est restée relativement stable, sans changements significatifs depuis le milieu des années 1980 (jusqu'aux recensements de 2011-2012), à environ 8 000 tonnes de phosphore produit annuellement dans chaque partie du BOLE. De multiples études réalisées au cours de la dernière décennie ont abouti à des estimations analogues, bien que les études reposent généralement sur les mêmes données primaires (données de recensement sur le nombre de têtes et données sur la production de fumier par animal). Une étude récente utilisant les données IPNI NuGIS pour le bassin hydrographique de la rivière Maumee a montré une tendance progressive à la hausse de la production de fumier du début des années 1990 à 2010 (Powers et al., 2016).

Comme les exploitations d'élevage ne sont pas uniformément réparties et que le fumier peut être transporté (bien qu'il y ait souvent peu d'information sur son épandage), la zone recevant ce fumier (et le lieu en soi au Canada) ne peut qu'être approximative. Dans l'évaluation de LimnoTech, la zone recevant ce fumier a été répartie entre les bassins versants HUC-8 aux États-Unis et dans les bassins tertiaires du Canada et normalisée en divisant la superficie totale du bassin par le total des terres cultivées pour illustrer la répartition spatiale de la production de phosphore dérivé du fumier ainsi que ses variations au fil du temps (Figure 2-3). Il s'agit d'une approximation pour donner une idée de l'intensité relative des opérations d'élevage et de l'application potentielle de fumier dans chaque bassin versant. Il est à noter que la normalisation est basée sur la superficie des terres cultivées, et non sur la zone recevant du fumier. Comme on peut s'y attendre de l'emplacement des exploitations animales (voir ci-dessous), les données montrent une production de fumier phosphoré généralement plus

élevée dans les parties supérieures des portions américaine et canadienne du BOLE. Il convient de noter qu'il s'agit d'une estimation approximative, et étant donné la probabilité de distances plus courtes entre la production de fumier et son épandage sur le terrain, des informations plus précises sur les sites d'élimination et les quantités réelles varieraient probablement même dans les bassins HUC-8 et tertiaires.

Une comptabilisation complète de la production de fumier à partir des exploitations d'élevage est difficile car les petites exploitations peuvent ne pas être réglementées ou signalées par des systèmes de permis réglementaires, bien qu'elles soient prises en compte dans les recensements agricoles. Pour ce projet, LimnoTech a cartographié les parcs d'engraissement (CAFO) autorisés du côté américain et a constaté que ceux qui s'occupent de production laitière sont beaucoup plus nombreux que ceux consacrés au bœuf, les premiers étant dispersés dans le bassin versant. En revanche, les CAFO des volailles et des porcs ont tendance à être plus présents en amont du bassin hydrographique, et on retrouve aussi de nombreuses fermes aux alentours des parties supérieures du bassin (LimnoTech, 2017).

LimnoTech (2017) a par ailleurs estimé que les CAFO autorisés représentent la grande majorité de la production de poules pondeuses, moins de la moitié de la production de vaches laitières et moins de la moitié de la production porcine (et donc la production de fumier). Comme c'est le cas pour l'épandage d'engrais commerciaux, le manque de données complètes ne permet pas une évaluation plus exhaustive de la production et de l'épandage de fumier. Les installations qui ne respectent pas les seuils d'autorisation ne seront pas saisies dans les données du programme de réglementation, et même pour les installations autorisées, il n'y aura généralement pas d'information sur les tendances concernant le nombre d'animaux, etc. (LimnoTech n'a pas été en mesure d'accéder facilement aux données sur les diverses exploitations d'élevage intensif en Ontario.)

En plus de la production de fumier estimée à partir des parcs d'engraissement du bétail, décrite ci-dessus, il existe des données sur la *superficie* estimée d'épandage du fumier, mais pas sur les quantités, selon les données du recensement agricole des comtés. Les résultats illustrés à la figure 2-4 concordent avec les renseignements sur la production de fumier (figure 2-3), montrant une superficie généralement plus grande recevant du fumier dans les parties supérieures de chaque bassin versant des deux pays. En outre, la figure ne montre pas de changements importants au fil du temps pour les périodes où les données sont disponibles, bien qu'il y ait des augmentations dans les zones recevant du fumier, en particulier en amont des bassins versants du côté américain.

Il est peu probable que le fumier soit transporté sur de longues distances, bien que le fumier de volaille soit plus transportable en raison de sa faible teneur en eau (LimnoTech, 2017). Selon une étude récente de chercheurs de l'Université du Michigan, environ 70 p. 100 du fumier émanant des CAFO serait épandu dans les cinq milles autour des installations de production (Long et al., 2017; LimnoTech, 2017). Sharpley (2006) fait valoir que le fumier n'est généralement pas transporté à plus de 10 milles du point de production. Dans tous les cas, comme l'a noté LimnoTech, les problèmes d'accessibilité des données et l'absence d'un ensemble de données géospatiales unique, même pour les exploitations autorisées, rendent très difficile la quantification précise des quantités et de la répartition spatiale exacte de l'épandage de fumier.

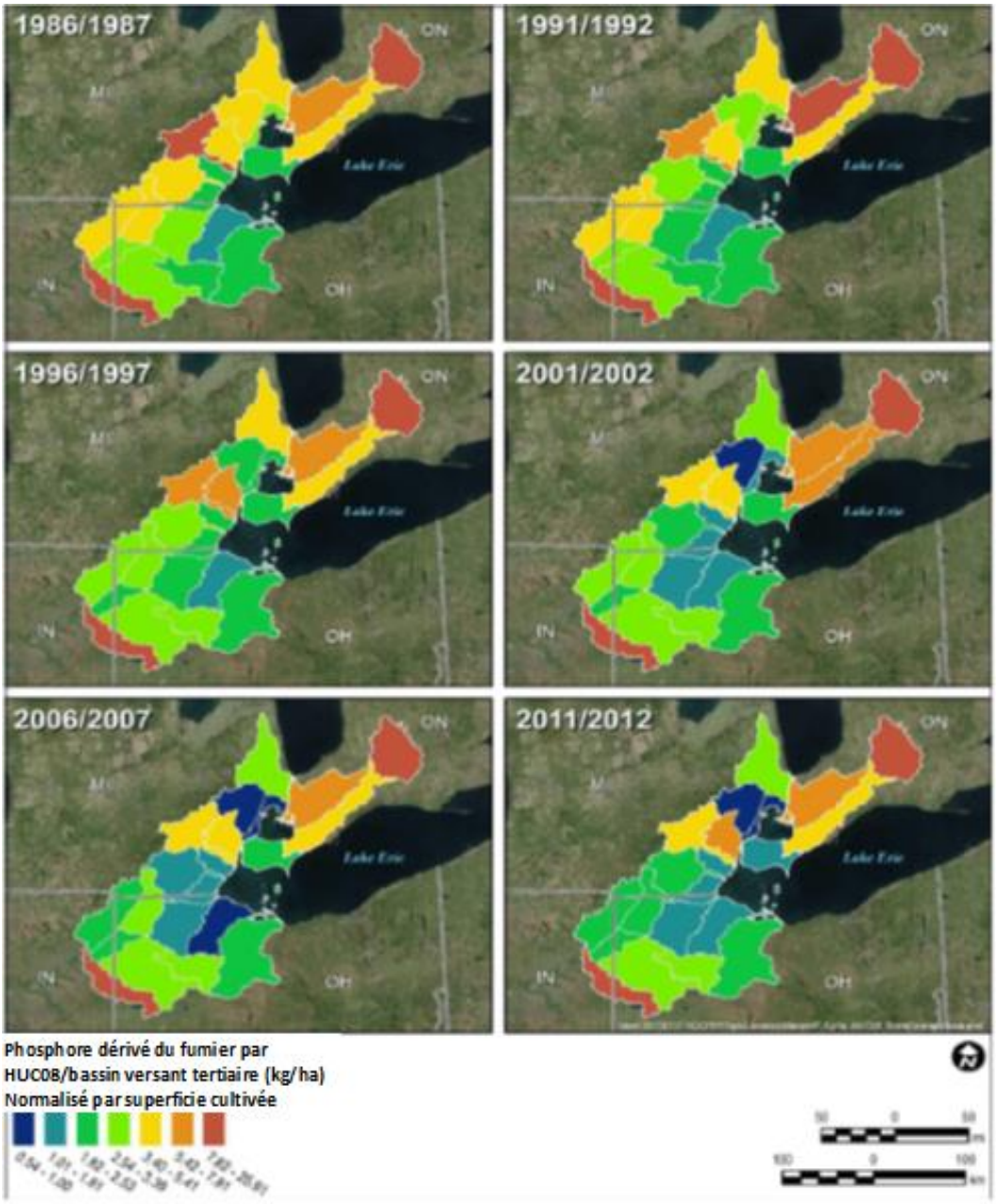


Figure 2-3. Tendances de production de phosphore dérivé du fumier du bétail par bassin versant (kilos par hectare là où la production est normalisée par superficie cultivée) dans le BOLE (LimnoTech, 2017)

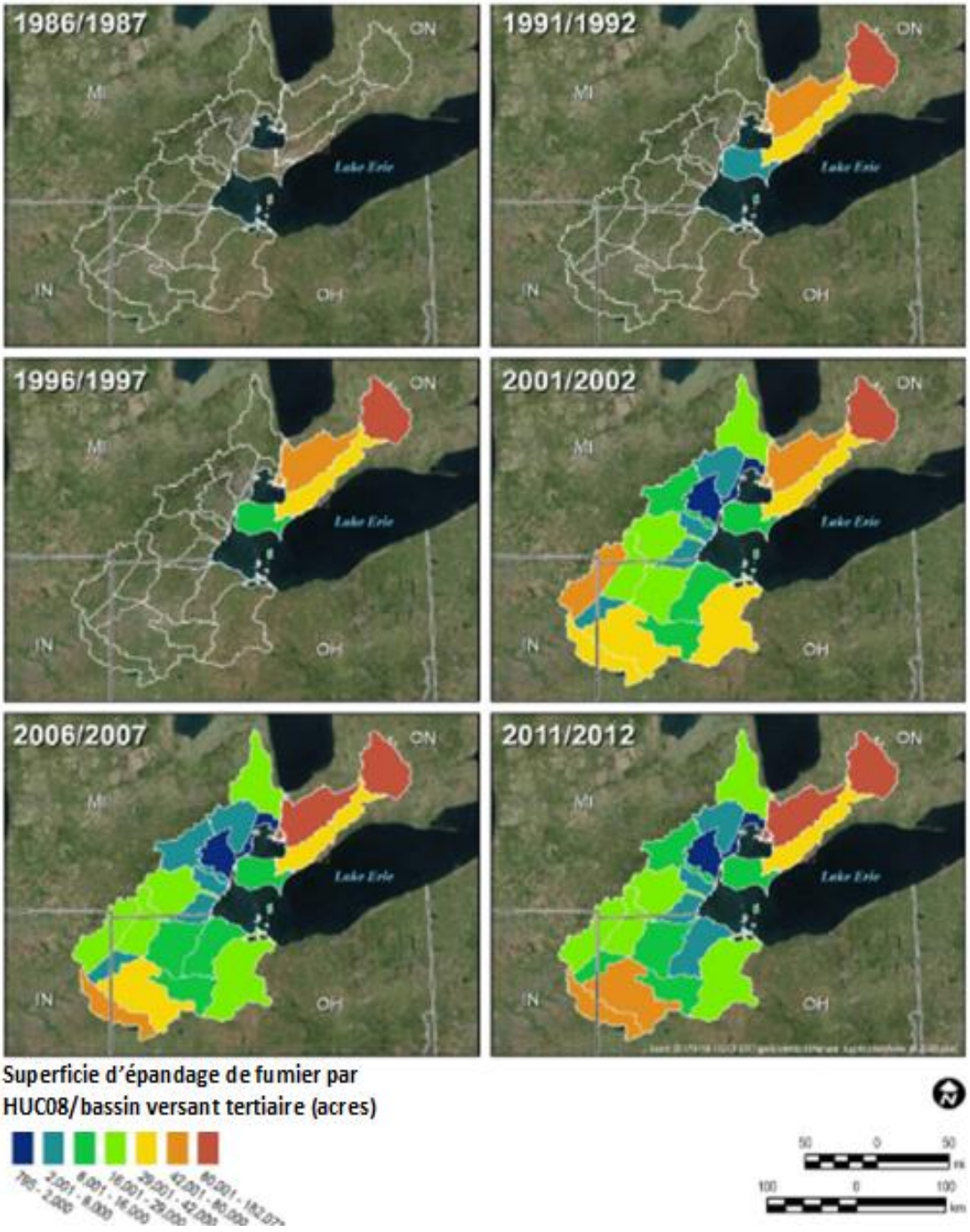


Figure 2-4. Tendances relevées dans l'épandage de fumier par superficie (acres) par bassin versant dans le BOLE selon les recensements agricoles effectués par les États-Unis et le Canada (LimnoTech, 2017)

2.4. Autres sources de nutriments : serres, herbicides et autres produits

Les eaux usées des serres et les produits contenant des nutriments autres que les engrais peuvent eux aussi être la source d'exportation de phosphore et d'azote agricole dans le bassin occidental du lac Érié (BOLE). La production en serre (par exemple pour les tomates, les poivrons et les concombres) a augmenté de façon appréciable en Ontario au cours des dernières décennies, en particulier dans le comté d'Essex, qui est le plus méridional. La production dans la partie américaine du BOLE se fait à une échelle beaucoup plus modeste, bien qu'il soit manifeste que l'on s'y intéresse de plus en plus. L'eau excédentaire ou « lixiviat » des serres peut être réutilisé dans les installations. Il y a eu peu de recherches sur les nutriments dans les eaux usées finales éliminées des serres. Bien que certaines recherches aient démontré des niveaux élevés de phosphore dans ces eaux usées dans les égouts près des serres, les données sont insuffisantes pour estimer les charges de phosphore total entrant dans les principaux affluents du lac Érié et le lac proprement dit en provenance de la production en serre [7].

Les herbicides utilisés dans le BOLE qui contiennent des nutriments comprennent souvent de l'azote (par exemple de l'atrazine, du métolachlore) et du glyphosate contenant du phosphore. Dans la partie américaine du BOLE, l'atrazine et le glyphosate ont été les principaux herbicides utilisés sur le maïs au cours des dernières années, tandis que le glyphosate a dominé pour le soja. LimnoTech (2017) a estimé que moins de 500 tonnes de phosphore sous forme d'herbicides étaient appliquées annuellement dans les champs de la partie américaine du BOLE. Le glyphosate et son principal produit de dégradation, l'acide aminométhylphosphonique (AMPA), peuvent être détectés régulièrement dans les échantillons des eaux de surface et souterraines, mais il semble que les apports de phosphore (même biodisponibles) aux charges totales du lac Érié seraient relativement minimes. Des recherches limitées ont exploré les effets directs potentiels du glyphosate sur les cyanobactéries, trouvant à la fois des effets promoteurs (p. ex., *Planktothrix*) et inhibiteurs (*Microcystis*). Certains insecticides (par exemple le chlorpyrifos) contiennent du phosphore (bien que ce taux soit relativement faible par rapport à la taille du bassin) et aucun amendement du sol utilisé dans la partie américaine ne contient du phosphore ou de l'azote (LimnoTech, 2017).

[7] P. ex., MEO, 2012. Également revu dans LimnoTech, 2017.

Les biosolides, qui sont des boues d'épuration provenant des usines de traitement des eaux usées, constituent une autre source potentielle d'éléments nutritifs pour la végétation. Bien que les biosolides aient des concentrations mesurables de phosphore et d'azote, cette source potentielle de nutriments n'a pas été prise en compte dans cette évaluation. Par exemple, pour l'usine de traitement des eaux usées du Detroit Water and Sewerage Department, la majeure partie de l'élimination des solides se fait par incinération, l'élimination des décharges et l'épandage étant effectués pour le reste aux endroits disponibles dans les 100 milles de l'installation (Ville de Détroit, 2014).

2.5. Le rôle de la gestion des nutriments pour le contrôle de leur ruissellement à la suite de l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier

De nombreux facteurs peuvent jouer sur le potentiel d'écoulement des nutriments associés aux engrais commerciaux et au fumier, y compris les conditions statiques (p. ex., inclinaison, texture du sol, profondeur de la nappe phréatique, P présent dans le sol, capacité de sorption du P, système de drainage); des conditions dynamiques des champs (p. ex., teneur en humidité, température (état décongelé ou congelé), compactage du sol); les caractéristiques des précipitations (p. ex., l'intervalle entre une précipitation et la suivante, la quantité et l'intensité de la précipitation); la gestion sur le terrain (p. ex., système de culture, étendue et type de labour, épandage d'engrais commerciaux, de fumier); caractéristiques des engrais (p. ex., type d'engrais commercial (superphosphate, phosphate monoammonium, etc.), type de fumier (origine, liquide, solide, teneur en phosphore, rapport N:P) et approche suivie pour l'application des nutriments (p. ex., application de surface avec ou sans incorporation, injection, taux, synchronisation)[8].

Bien que tous ces facteurs puissent influer sur le ruissellement des éléments nutritifs, les questions de gestion des éléments nutritifs (y compris les caractéristiques des engrais et les méthodes d'épandage) ont été au cœur de ce projet, tant pour les engrais commerciaux que pour le fumier, et ces questions seront étudiées plus longuement dans les sections suivantes.

[8] Adapté d'une discussion sur l'épandage de fumier, in LimnoTech, 2017 (pp. 54-56).

2.5.1. Gestion des nutriments et épandage d'engrais commerciaux

Les dernières années ont vu l'élaboration de deux programmes de réglementation (dont le projet de loi 1 du Sénat en Ohio, avec des restrictions sur l'épandage d'engrais, y compris par saison et prévisions météorologiques annonçant des précipitations) et des programmes volontaires de gestion des nutriments. Le programme de gérance des nutriments 4B (4R en anglais), qui a été conçu et mis au point par plusieurs organisations, notamment le International Plant Nutrition Institute, The Fertilizer Institute et Fertilisants Canada (Vollmer-Sanders et al., 2016). Le programme 4B comprend quatre catégories de pratiques, certaines pouvant être poursuivies individuellement (Bruulsema, 2009; LimnoTech, 2017) :

- la Bonne source (tenir compte de la forme nutritive, poursuivre la fertilisation équilibrée (compte tenu de l'azote, du phosphore, du potassium)
- le Bon taux (utilisation de tests de sol, analyse des objectifs de rendement, inspection des cultures, technologie à taux variable)
- le Bon moment (calendrier d'épandage, engrais à libération contrôlée)
- le Bon endroit (méthode d'épandage, incorporation d'engrais)

Le programme a mis l'accent sur les engrais commerciaux, bien qu'il soit reconnu que l'épandage de fumier doit être également envisagé (IPNI, 2017). En plus des agriculteurs, le programme implique un large éventail de professionnels dans sa mise en œuvre, y compris les détaillants agricoles, les conseillers agricoles et les épandeurs d'engrais. La mise en œuvre du programme a été encouragée par un programme de certification pour les fournisseurs de services nutritionnels, lancé en 2014.
La norme du programme de certification comporte plusieurs éléments, y compris une section sur les recommandations et les applications des éléments nutritifs, qui traite de chacune des catégories 4B (4R en anglais). L'organe directeur du programme est le Nutrient Stewardship Council, dont les membres sont répartis entre quatre secteurs (entreprises agricoles, gouvernement, ONG et universités/chercheurs) dont les responsabilités comprennent l'examen des modifications à la norme, la délivrance de certificats et la formation des vérificateurs.

Du côté canadien, le programme de gérance des nutriments 4B en est à ses débuts, et en 2015, le gouvernement de l'Ontario, l'Ontario Agri-Business Association et Fertilisants Canada ont conclu un protocole de coopération dans ce contexte. Cet engagement formel entraînera un investissement combiné de 300 000 $ sur trois ans (Smith, 2016) pour aider les agriculteurs de l'Ontario à réduire autant que possible leurs effets sur l'environnement tout en optimisant le rendement des cultures. L'American Society of

Agronomy offre également la désignation 4R dans le cadre de son programme Certified Crop Advisor et, avec le soutien de Fertilisants Canada et de l'Ontario Agri Business Association, cette spécialité en gérance des nutriments 4B (4R) étant également offerte par le programme ontarien pour l'agrément des conseillers agricoles.

Bien que le programme soit aussi relativement nouveau aux États-Unis, en avril 2016, environ 35 p. 100 des terres agricoles du BOLE avaient connu les effets du programme de certification 4B (4R) (Vollmer-Sanders et al., 2016). Des recherches récentes ont indiqué que les agriculteurs de la région avaient déjà réalisé des pratiques apparentées aux éléments 4R même avant la parution du programme de certification. Par exemple, dans une étude de la partie de l'Ohio du bassin de la rivière Maumee, Wilson et al. (2013) ont constaté que seuls 15 p. 100 des agriculteurs ne testent jamais le sol, 68 p. 100 utilisent un plan de gestion des éléments nutritifs au moins une partie du temps et 71 p. 100 évitent généralement l'application de fumier ou d'engrais commerciaux en automne ou en hiver (Wilson et al., 2013; LimnoTech, 2017).

Compte tenu de la nouveauté du programme de certification 4B (4R), l'évaluation n'en est qu'à ses débuts. Un examen général de plusieurs études sur divers types de bassins versants de l'est de l'Amérique du Nord (y compris dans des régions très différentes du BOLE) sur 50 ans (et donc il y a eu de nombreuses études avant l'adoption officielle du programme 4B) n'a pas abouti à des conclusions définitives sur l'efficacité de la synchronisation et de la voie de transport, particulièrement en ce qui a trait au phosphore (Christianson et al., 2016). Par ailleurs, des recherches plus récentes dans le BOLE ont montré des résultats positifs au chapitre des pratiques de gérance des nutriments. Par exemple, des études récentes à grande échelle dans le BOLE ont montré une réduction de l'exportation de P suite à la mise en œuvre de pratiques 4B, notamment l'incorporation d'engrais appliqués en surface (Williams et al., 2016; King et al., 2017). Il y a également eu plus d'efforts de modélisation à l'échelle du paysage pour examiner les effets potentiels de la mise en œuvre des 4B. Dans une étude de modélisation SWAT avec des contributions d'intervenants agricoles et autres dans le BOLE, Kalcic et al. (2016) ont constaté que l'utilisation généralisée de pratiques de gestion optimales (PGO) (en particulier le placement d'engrais souterrains) serait nécessaire pour approcher les objectifs de réduction du phosphore dans le BOLE (voir plus loin la discussion sur l'utilisation des modèles au chapitre 5). En se fondant sur des informations d'enquête sur les pratiques et la modélisation des bassins versants dans le BOLE, l'étude CEAP 2016 a également constaté que l'utilisation régulière et généralisée des pratiques 4B serait nécessaire pour en réaliser pleinement et systématiquement tous

les avantages potentiels (USDA 2016, LimnoTech, 2017). Eu égard aux études relativement limitées sur l'efficacité réelle des pratiques 4B sur l'exportation du phosphore, des efforts de recherche (dont un vaste projet de recherche multidisciplinaire) sont en cours pour examiner l'efficacité du programme (Vollmer-Sanders et al., 2016) et c'est un domaine qui nécessite une attention continue.

Malgré des recherches relativement limitées sur l'efficacité des diverses pratiques de gérance des nutriments pour réduire les exportations de P dans le BOLE, les données montrent une tendance générale à long terme à réduire les apports de P (engrais commerciaux et fumier confondus) par rapport au P retiré avec la récolte, comme il en a été question ci-dessus. Les données NuGIS montrent en particulier que le bilan de phosphore partiel (engrais phosphoré et fumier épandu moins absorption par les cultures) devient de plus en plus négatif dans la plupart des superficies agricoles du BOLE, de 1997 à 2012 [9], d'où un appauvrissement du phosphore du sol qui devrait réduire les charges de P dans le lac Érié avec le temps (voir la discussion plus poussée au chapitre 5).

2.5.2. Gestion des nutriments et épandage du fumier

Les méthodes d'épandage du fumier varient et peuvent différer en ce qui concerne la perte potentielle d'éléments nutritifs dans les cours d'eau. Les méthodes utilisées comprennent l'injection de lisier et l'application en surface de fumier liquide ou solide (ou composté), avec ou sans incorporation. Certaines recherches montrent que l'injection de fumier liquide et l'incorporation de fumier appliqué en surface par le labour entraînent une perte nettement plus faible de PT et de PRD comparativement à l'application en surface sans incorporation[10]. En ce qui concerne les méthodes utilisées, la méthode d'épandage suivie du côté canadien est évaluée par des enquêtes régulières auprès des organismes, et les données des recensements agricoles de 2006 et 2011 indiquent que 36 p. 100 du fumier épandu a été injecté sous forme liquide et 30 p. 100 sous forme de compost) (LimnoTech, 2017). Du côté américain, les méthodes d'épandage ont été évaluées dans le cadre d'études individuelles, bien que différentes méthodologies/questions d'enquête rendent plus difficile une synthèse plus étoffée. Plusieurs études récentes ont indiqué qu'une fraction relativement faible des agriculteurs du BOLE a déclaré avoir épandu du fumier (p. ex., jusqu'à 33 p. 100 dans une étude des bassins versants de la rivière Maumee et de la rivière Sandusky) (Prokup et al., 2017). Une autre étude a révélé que 34 p. 100 des agriculteurs ont déclaré avoir

[9] Données cartographiques NuGIS fournies par LimnoTech, 2017.
[10] Revu in LimnoTech, 2017.

incorporé du fumier dans le bassin de la rivière Maumee (Wilson et al., 2013). Quant aux terres cultivées, 12 p. 100 de la portion américaine du BOLE et 16 p. 100 du côté canadien ont reçu du fumier en 2012 (LimnoTech, 2017). Il est manifeste qu'une collecte plus systématique des données sur les méthodes d'épandage de fumier s'avère nécessaire (en particulier du côté américain) pour mieux suivre l'étendue des pratiques individuelles dans le BOLE (LimnoTech, 2017).

En ce qui concerne la production de fumier et la disponibilité potentielle du phosphore, la tendance vers une plus grande concentration d'animaux dans des installations plus vastes (voir la section 2.1) peut entraîner une application excessive de fumier ou des « points chauds » puisque le fumier n'est généralement pas transporté sur de longues distances (comme indiqué ci-dessus), et les nutriments disponibles peuvent dépasser les besoins de la ferme produisant le fumier et des fermes avoisinantes. Les pertes de fumier non récupéré (provenant des déversements ou du bétail dans les pâturages) et l'application excessive d'engrais à proximité des CAFO et d'autres grandes concentrations de bétail peuvent entraîner une augmentation des exportations de P et son accumulation dans les sols et les sédiments (Long et al., 2017). Comme nous l'avons déjà mentionné, les exploitations d'élevage des deux côtés de la frontière ont tendance à être plus nombreuses en amont du BOLE. De plus, les exploitations d'élevage de toute taille peuvent être concentrées dans des zones ayant des activités connexes (par exemple, la transformation et l'emballage de la viande, la transformation des œufs). Il est à noter en outre que les zones d'élevage de divers animaux (même les installations plus petites et non autorisées) peuvent accroître la disponibilité locale de phosphore (soit accumulé dans le sol ou transporté dans les eaux de ruissellement), mais des recherches supplémentaires sont nécessaires dans ce domaine.

La disponibilité du phosphore après l'épandage du fumier dépend de multiples facteurs, dont la forme de fumier et la biogéochimie des sols. Des recherches récentes ont montré que le phosphore hydrosoluble plus élevé dans le fumier équivaut à des niveaux plus élevés de phosphore dans le ruissellement de surface[11]. De plus, les fumiers riches en matière organique peuvent améliorer la santé du sol et favoriser l'infiltration (entraînant ainsi une perte moindre de P dans les eaux de ruissellement) (Sharpley et al., 2002). En même temps, les recherches ont montré qu'il peut y avoir une variation appréciable du phosphore extractible à l'eau dans le fumier, à la fois selon le type de bétail et selon la forme de stockage du fumier (liquide ou solide) (Kleinman et al., 2005; 2017). Des recherches plus récentes au Canada ont mené à l'élaboration de

[11] Revu in LimnoTech, 2017.

coefficients de sources de phosphore du fumier (combinant le fumier et le sol), que les chercheurs ont recommandé d'incorporer dans l'indice de risque du phosphore de l'Ontario (Wang et al., 2016). Les complexités de la question sont illustrées par les préoccupations potentielles liées à l'injection de fumier liquide (lisier) conduisant au transport de P par des macropores vers les tuyaux de drainage (bien que cela soit réglementé dans certaines administrations). Les préoccupations potentielles concernant le transport amélioré du P du sous-sol après l'injection ou l'incorporation ont été soulignées dans un examen récent des données compilées dans la base de données MANAGE (Measured Annual Nutrient Loads from AGricultural Environments)[12]; mais il est également important de garder à l'esprit les différences potentielles entre les caractéristiques du sol dans le BOLE et d'autres systèmes (par exemple la texture, le développement des macropores, la saturation en phosphore du sol et la capacité de rétention de P supplémentaire, etc.)[13].

Un examen récent des données compilées dans la base de données MANAGE a révélé que le P organique (p. ex., fumier, débris de feuilles mortes) était en moyenne appliqué à des taux de P plus élevés que l'engrais inorganique (commercial), ce qui procurait des rendements moyens plus élevés de maïs. Cependant, les mêmes données n'ont révélé aucune différence significative dans les exportations ou les pertes de P (PRD ou P total) dans les champs recevant des engrais organiques plutôt qu'inorganiques, malgré le petit nombre de sites disponibles pour les premiers (7) [14].

Les recherches ne font que se multiplier sur des études à grande échelle sur la mobilité du P en fonction de la variation du type d'engrais dans la région. Par exemple, de récentes recherches au Centre de recherche et de développement de Harrow en Ontario ont révélé une augmentation significative de l'exportation de PRD (mais pas de particules) avec l'ajout de compost de feuilles pour les champs labourés à long terme (2,9 et 5,3 fois plus par rapport aux champs ne recevant pas de compost de feuilles) (Zhang et al., 2017). Il est à noter que l'étude n'incluait pas d'évaluation parallèle des possibles effets de l'ajout de P équivalent dans les engrais commerciaux. En outre, les recherches actuelles du Service de conservation des ressources naturelles (NRCS) du Département américain de l'Agriculture (USDA) en Ohio examinent les différences de

[12] Christianson et al., 2016; à noter qu'aucune différence importante n'a été appréciée dans la charge de PRD, mais les données étaient limitées.
[13] Joosse, P., communication personnelle.
[14] Christianson et al., 2016; l'étude faisait allusion à des engrais « inorganiques » (plus ou moins équivalents aux engrais commerciaux tels qu'entendus ici) et à des engrais « organiques » (englobant le fumier et les feuilles mortes).

ruissellement de P entre les champs appariés recevant des engrais commerciaux et du fumier (LimnoTech, 2017).

Des efforts supplémentaires ont également été déployés pour mettre au point des outils et des indicateurs permettant d'estimer la perte potentielle de phosphore (ou la livraison dans les eaux de surface), après l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier. Un outil mis au point par l'USDA et validé par 21 études sur le terrain a été trouvé apte à estimer la perte de P pour les phases totales, dissoutes et particulaires en utilisant des méthodes simples et des données facilement disponibles (Vadas et al., 2009). Le Canada a utilisé un indicateur appelé IRCE_P (indicateur de risque de contamination de l'eau par le phosphore) à l'échelle nationale. L'outil évalue le risque d'écoulement du phosphore contenu dans le sol et émanant de l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier, en plus de déterminer le degré d'accumulation du P dans les sols à l'échelle du paysage (Van Bochove et al., 2011; LimnoTech, 2017).

Malgré tous les efforts décrits ici - y compris des études à grande échelle et l'élaboration d'outils et d'indices à appliquer à diverses échelles sur le terrain - l'examen technique de ce projet a constaté qu'il n'existe aucune méthode analytique ou méthode d'évaluation des données pour faire la distinction entre les contributions à la charge annuelle moyenne de PT du fumier par rapport aux engrais inorganiques phosphorés pour les aires de drainage des États-Unis ou du Canada vers le BOLE (LimnoTech, 2017). L'un des défis relevés consistait à déterminer des « règles empiriques » pour la quantité de phosphore exportée du sol où le fumier est épandu, compte tenu des nombreux facteurs mentionnés dans cette section qui pourraient avoir une incidence sur le transport du phosphore. L'incertitude prévaut notamment à l'égard de la méthode d'épandage et sa synchronisation (Long et al., 2017) et il faut d'autres données (p. ex., sur la production de fumier, les ventes d'engrais et des données sur les limites d'application) et hypothèses (p. ex., concernant les lieux d'épandage) pour pouvoir estimer l'importance relative des apports des deux grandes formes d'engrais aux charges en nutriments du lac. Étant donné les différences apparentes au niveau de l'épandage de fumier dans le BOLE (p. ex., taux plus élevés en amont des bassins hydrographiques de chaque pays), des études plus poussées s'avèrent nécessaires (appuyées par une modélisation appropriée) et elles devront tenir compte d'une diversité de facteurs, dont une estimation de l'épandage d'engrais à la plus haute résolution temporelle et spatiale, les transformations potentielles des éléments nutritifs qui échappent des champs et les contributions d'autres sources en aval.

2.6. Aperçu de l'épandage d'engrais commerciaux et de la production de fumier dans le bassin occidental du lac Érié

Selon les toutes dernières données sur l'épandage d'engrais et la production de fumier relevées par les recensements agricoles, le phosphore contenu dans les engrais commerciaux dépasse la quantité produite par le fumier et ce, dans la portion américaine aussi bien que canadienne du bassin occidental du lac Érié (BOLE). Comme le montre le tableau 2-3, les États-Unis fournissent la plus grande partie (72 p. 100) du phosphore appliqué aux bassins versants du BOLE, qu'il provienne des engrais commerciaux ou du fumier. Les engrais commerciaux dominent (81 p. 100 du total) dans les bassins versants des États-Unis, alors que ceux de l'Ontario reçoivent un peu plus de P émanant du fumier (52 p. 100) par opposition aux engrais commerciaux. Il est à noter que les valeurs se rapportent au fumier produit par rapport au P résultant de l'épandage d'engrais commerciaux. Or, comme les données dont on dispose sont limitées, il est raisonnable de supposer que le gros du fumier produit dans les deux parties du BOLE est épandu à l'intérieur du bassin.

Tableau 2-3. Quantité de phosphore produite par l'épandage de fumier et d'engrais commerciaux dans le bassin occidental du lac Érié, 2006-2007 (selon LimnoTech, 2017).

Pays	P Total (kg)	P Total (kg) %	P produit par le fumier (kg)	P produit par le fumier comme % du P Total	P résultant de l'épandage d'engrais commerciaux (kg)	P résultant de l'épandage d'engrais commerciaux comme % du P Total
États-Unis (2007)	41 687 180	72	7 735 580	19	33 951 601	81
Canada (2006)	16 326 671	28	8 443 129	52	7 883 542	48
Total	58 013 851	100	16 178 709	28	41 835 143	72

2.7 Récapitulation et données manquantes

Voici quelques-unes des principales conclusions tirées de cette partie de l'évaluation :

- D'après de récentes enquêtes de recensement avec des données comparables, les engrais commerciaux phosphorés représentent 72 p. 100 du phosphore total utilisé dans l'agriculture dans le BOLE (engrais commerciaux ou sous forme de fumier).
- L'importance relative des engrais commerciaux par rapport au fumier varie d'un pays à l'autre, l'épandage commercial représentant plus de 80 p. 100 du total

utilisé dans la portion américaine, alors que les deux composantes sont similaires dans la partie canadienne du bassin.

- L'intensité d'épandage des engrais commerciaux phosphorés (kg ha^{-1}) a généralement baissé dans le bassin hydrographique depuis les années 1980 et les données pour les années de recensement dans la partie américaine du bassin révèlent une tendance générale vers un bilan de phosphore négatif (plus de P perdu par les cultures que celui rajouté comme engrais). Cependant, il existe encore des différences spatiales, l'épandage étant en général plus intense dans la partie canadienne que dans la partie américaine du bassin, et en particulier, dans les sous-bassins versants est et sud du bassin versant américain et la région d'Essex du côté canadien.
- Les estimations de phosphore pour le fumier produit (kg ha^{-1}) ont montré des déclins dans certains bassins versants, et essentiellement aucun changement dans d'autres, dans les portions américaine et canadienne du BOLE. De plus, le taux de phosphore produit dans le fumier et épandu (en supposant une application près des sources) est généralement plus élevé en amont des deux bassins versants.
- La quantité de phosphore entrant dans les bassins versants provenant d'autres sources agricoles - serres, autres produits agricoles et pesticides - est considérablement inférieure à celle émanant des deux principales sources étudiées ici, et ne contribue probablement pas de façon importante aux charges ou aux répercussions dans le lac Érié (bien que des effets localisés soient possibles).
- On adopte de plus en plus des stratégies de gestion du phosphore agricole, dont le programme de gérance des nutriments 4B, l'application d'une loi récente de l'Ohio limitant l'épandage d'engrais dans certaines conditions, et les informations se font de plus en plus disponibles grâce à des enquêtes sur les approches réellement suivies pour l'épandage d'engrais.

Cette évaluation a également relevé un certain nombre de lacunes dans l'information concernant l'importance relative de la teneur en phosphore des engrais commerciaux par rapport au fumier dans le BOLE. Étant donné que l'acquisition de données sur de nombreuses composantes agricoles (rotation des cultures, usage d'engrais commerciaux, nombre d'animaux et production de fumier, etc.) n'est effectuée que tous les cinq ans par le biais de recensements agricoles, il manque des informations sur les changements d'une année à l'autre, qui pourraient éventuellement avoir des répercussions sur les exportations de nutriments et sur la qualité de l'eau. De plus, les

politiques de confidentialité en vigueur relatives à la divulgation des données sur les exploitations signifient que la plupart des données accessibles au public sont compilées à l'échelle des comtés (ou à une échelle plus vaste) ou ne sont carrément pas divulguées, ce qui exige que l'on tire des conclusions hypothétiques sur les valeurs apparentées aux divers bassins versants. Les données sur l'épandage d'engrais ne sont pas directement disponibles via les recensements et les données commerciales annuelles sur les ventes d'engrais proviennent des États et sont compilées (et disponibles pour achat) auprès des responsables du contrôle des aliments, soit l'Association of American Plant Food Control, sous réserve de préciser qu'elles ne sont pas toujours disponibles pour un État, un comté ou une année donnés et leur parution peut parfois subir un retard de plusieurs années (AAPFCO, 2017). Ainsi, dans la présente évaluation, il n'a pas été possible d'examiner les changements dans l'épandage d'engrais commerciaux qui auraient pu influer sur l'évolution des charges nutritives et des effets sur le lac Érié au cours des cinq ou six dernières années. Par ailleurs, on a pu observer certains patrons à l'origine des répercussions sur le lac Érié (en particulier l'augmentation des charges de PRD) depuis les années 1990. Par conséquent, il n'est pas clair si des estimations plus récentes des taux d'épandage d'engrais peuvent oui ou non déformer de manière significative la compréhension des facteurs clés affectant la qualité de l'eau dans le BOLE que l'on a relevés au fil de la dernière décennie.

Les données sur la production et l'épandage du fumier sont encore plus limitées. Alors que les données sur le cheptel au niveau des comtés sont disponibles par le biais de recensements agricoles tous les cinq ans, il est plus difficile d'obtenir des données sur les exploitations individuelles. Les données sur les installations qui n'atteignent pas les seuils d'admissibilité ne sont pas du domaine public, et le nombre de celles qui existent dans le BOLE n'est pas clair (Rissien, 2017). Les installations plus grandes peuvent ne pas nécessiter de permis (si elles ne font pas de déversements dans un plan d'eau) ou peuvent encore être en voie d'obtenir un permis de déversement. La situation devient d'autant plus compliquée du fait du manque d'uniformité de la réglementation étatique et provinciale dans le BOLE.

En outre, les informations sont souvent limitées sur le devenir du fumier produit dans une installation donnée. Bien que des études aient montré que le fumier n'est généralement pas transporté sur de longues distances, il existe un potentiel de déplacement du lisier entre les limites du comté et même au-delà des limites du BOLE, ce qui est important compte tenu du vaste nombre d'installations autorisées en amont du bassin ou ses alentours (LimnoTech, 2017). Même pour les installations autorisées, le

suivi de renseignements concrets (quantités, emplacement, calendrier, etc.) sur la production et l'épandage de fumier peut exiger de longues démarches de demande de documents publics (et de révision de documents) de la part des autorités compétentes, et là encore, l'information risque d'être incomplète car elle est parfois autodéclarée [15]. Précisons que le Conseil de la qualité de l'eau de la CMI a entrepris un projet d'examen des questions de politique entourant la production et l'épandage du fumier et les exploitations d'élevage dans les Grands Lacs [16].

Il est manifeste qu'il faut disposer d'informations plus détaillées sur l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier dans le BOLE, à la fois sur des échelles temporelles et spatiales. Des rapports plus détaillés et cohérents sur les ventes d'engrais au niveau étatique et provincial (y compris des données annuelles par comté) permettraient de mieux comprendre les tendances. Il serait également utile de poursuivre des études comme le CEAP susceptibles d'explorer des données plus spatialement résolues dans le bassin versant qui ne sont pas accessibles au public (mais qui peuvent néanmoins contribuer à la compréhension des processus, y compris dans le cadre de la modélisation).

Il faut des informations plus détaillées sur le fumier dans le BOLE et que la collecte de données se fasse de manière plus cohérente et accessible sur la production et l'utilisation du fumier par les États et l'Ontario, en particulier en ce qui a trait aux lieux d'épandage. De plus, des efforts de recherche continus peuvent aider à résoudre ces problèmes, par exemple en tentant de suivre l'empreinte des sources d'éléments nutritifs dans le bassin. Comme il en est question plus loin dans le présent rapport, les complexités du cycle des nutriments (y compris leur transport et leur devenir en aval des champs) continueront de poser des difficultés pour pouvoir discerner les contributions relatives de ces deux sources nutritives aux charges et aux répercussions dans le lac Érié. D'autres efforts de recherche susceptibles d'aider à résoudre ces problèmes sont indiqués plus loin dans ce rapport.

[15] Voir par exemple Rissien, 2017; Long et al., 2017.
[16] Voir CMI, 2017a.

3. Dans quelle mesure la surveillance sur place et à distance des affluents et des eaux libres permet-elle d'évaluer les apports des diverses sources d'engrais?

Toute recherche d'hypothèses sur les causes et la gravité de l'eutrophisation nécessite des informations fournies par les programmes de surveillance (Dolan et McGunagle, 2005). Les données de surveillance ont été essentielles pour déterminer les tendances spatiales et temporelles des charges nutritives dans tous les Grands Lacs (Dolan et Chapra, 2012), alors que les données de surveillance à long terme pour les principaux bassins versants du lac Érié ont permis aux chercheurs de démontrer l'importance des activités agricoles de réduction des sources diffuses pour une tendance à la baisse des concentrations de phosphore total pondéré en fonction du débit (Richards et al., 2001, Richards et Baker, 1993), ainsi que de détecter les augmentations du phosphore réactif dissous depuis le milieu des années 1990 (Richards et al., 2010). Tel que décrit plus loin, les données sur la surveillance sont essentielles à divers efforts de modélisation et de prévision, y compris l'étalonnage, l'élaboration et l'essai de scénarios de réduction des charges de phosphore ciblées à l'aide de l'outil d'évaluation du sol et de l'eau (SWAT).

En raison de l'importance du suivi des données pour détecter les changements et servir de fondement aux évaluations quantitatives, ce projet décrit les principaux programmes de surveillance des affluents et des eaux libres du lac, les activités de surveillance par télédétection et les bases de données qui stockent et diffusent les données afférentes à la surveillance. De plus, un certain nombre de programmes de surveillance émergents, expérimentaux ou de durée limitée ont également été examinés (LimnoTech, 2017).

3.1. Programmes de surveillance des bassins versants et du lac sur place et à distance

Des dizaines de programmes de surveillance de la qualité de l'eau dans tout l'ouest du lac Érié et ses bassins versants comptent sur l'appui d'organismes fédéraux, étatiques/provinciaux et locaux, d'entités universitaires et d'organisations non gouvernementales. Le rapport technique du projet (LimnoTech, 2017) contient une courte description de chacun des principaux programmes de surveillance des affluents et des eaux libres du lac, qui est résumée au tableau 3-1 ci-dessous. Des résumés récents de programmes de surveillance en cours ont également été décrits par d'autres chercheurs (p. ex., Betanzo et al., 2015).

Tableau 3-1 : Tableau récapitulatif des principaux programmes de surveillance des affluents et des eaux libres du bassin occidental du lac Érié[17]

Organisme	Étendue spatiale	Principaux paramètres contrôlés*	Fréquence d'échantillonnage	Site Web
Programmes de surveillance des affluents				
National Center for Water Quality Research (Heidelberg University)	Partie américaine du BOLE	PT, PRD, ammonium, nitrate	Une ou plusieurs fois par jour	https://www.heidelberg.edu/academics/research-and-centers/national-center-for-water-quality-research
U.S. Geological Survey	Partie américaine du BOLE	PT, PRD, TKN, ammonium, nitrate, sédiments en suspens	Mensuelle et en cas de précipitations	https://waterdata.usgs.gov/nwis
U.S. Department of Agriculture – Agricultural Research Service	Divers lieux en bordure des champs et comportant des tuyaux de drainage	Plusieurs espèces, libération de P et N	Plusieurs fois par jour	http://amarillo.nserl.purdue.edu/ceap/index.php
Ohio Environmental Protection Agency	Rivière Maumee et plusieurs affluents	PT, PRD	À des intervalles de 5-10+ ans	http://www.epa.state.oh.us/dsw/tmdl/maumeeriver.aspx
Michigan Department of Environmental Quality	Côté américain du couloir Huron-Érié	PT, TKN, nitrate, ammonium	Par rotation tous les 5 ans	http://www.michigan.gov/deq/0,4561,7-135-3313_3681_3686_3728-32361--,00.html
Province de l'Ontario – plusieurs programmes dont le Réseau provincial de contrôle de la qualité de l'eau (en partenariat avec les autorités de conservation)	Partie ontarienne du BOLE	PT, PRD, TKN, nitrate, nitrite	Mensuelle et en cas de précipitations	https://www.ontario.ca/fr/donnees/reseau-provincial-de-controle-de-la-qualite-de-leau-ruisseau
Programmes de surveillance des eaux libres du lac				
U.S. Environmental Protection Agency (plusieurs programmes)	BOLE	PT, PRD, TKN, nitrate, ammonium, clarté,	Varie selon le programme;	https://www.epa.gov/great-lakes-monitoring

[17] Partiellement extrait de LimnoTech, 2017.

		turbidité, oxygène dissous	le programme hydro-chimique prélève des échantillons au printemps et en été	
Environnement et Changement climatique Canada (plusieurs programmes)	BOLE	PT, PRD, TKN, nitrate, ammonium, chlorophylle clarté, tempéra-ture, pH	Varie selon le pro-gramme	http://www.ec.gc.ca/scitech/default.asp?lang=Fr&n=3F61CB56-1
National Oceanographic and Atmospheric Administration & Cooperative Institute for Great Lakes Research	BOLE	Micro-cystine	Sur une base continue ou hebdomadaire, suivant la station	https://www.glerl.noaa.gov/res/HABs_and_Hypoxia/habsMon.html.
Ohio Environmental Protection Agency (plusieurs programmes)	Rivage de l'Ohio dans le BOLE	PT, PRD, TKN, nitrate ammonium, chlorophylle micro-cystine	Varie selon le pro-gramme	http://www.epa.ohio.gov/Portals/35/lakeerie/2015_Erie_Study_Plan.pdf
Province de l'Ontario (plusieurs programmes)	Rivage de l'Ontario dans le BOLE	Nutriments (diverses formes)	Varie selon le pro-gramme	https://www.ontario.ca/fr/recherche/donnees-publiques
Lake Erie Center, University of Toledo	Alentours de la rivière Maumee (transects entre le rivage et les eaux libres)	PT, PRD, TKN, nitrate, ammonium, chlorophylle	Deux fois par semaine, de mai à sept.	http://www.utoledo.edu/nsm/lec/
Ohio State University	Partie américaine du BOLE	Nutriments (diverses formes)	Varie suivant la station	https://ohioseagrant.osu.edu/research/live/water

* : PT : phosphore total; PRD : phosphore réactif dissous; TKN : azote total selon la méthode Kjeldahl.

En plus des programmes de surveillance établis, cette évaluation a recensé plusieurs nouveaux efforts de surveillance ou de recherche. L'EPA de l'Ohio a entrepris un programme d'échantillonnage intensif du bassin versant de la rivière Maumee afin de cerner les points chauds de chargement des nutriments. Le programme aidera les organismes de réglementation à cibler les plus grandes sources de charges avec des programmes d'amélioration des bassins versants (WTOL, 2017, OEPA, 2015). Cette étude a également relevé un projet qui examine les sources de phosphore dans les affluents du lac Érié à l'aide d'isotopes stables de l'oxygène dans les phosphates (universités de Bowling Green State, Heidelberg et Ohio State) et un autre projet à l'Ohio State University qui utilise les empreintes de phosphore organique pour caractériser les sources d'eaux usées urbaines et traitées[18]. En général, les recherches sur l'utilisation des isotopes stables s'intensifient dans le cadre d'études sur le cycle biogéochimique des nutriments dans les bassins hydrographiques (p. ex., Tamburini et al., 2014). Par exemple, une étude impliquant des isotopes stables d'azote et d'oxygène dans une rivière en Angleterre a exploré les sources et l'importance relative des processus biotiques par opposition à abiotiques sur le cycle de l'azote et du phosphore dans la rivière (Gooddy et al., 2016).

Un certain nombre de programmes de télédétection couvrent le lac Érié et son bassin hydrographique et sont examinés dans le rapport technique du projet (LimnoTech, 2017). Le programme National Centers for Coastal Ocean Science de la NOAA a mis au point un système de prévision saisonnière des efflorescences algales nuisibles (EAN) pour l'ouest du lac Érié (Stumpf et al., 2012), qui a été mis en marche en juillet 2017. Ce système de prévision se fonde sur l'intensité des efflorescences mesurée par quatre agences spatiales européennes et les instruments satellitaires de la NASA qui mesurent la température de surface, les concentrations de sédiments et de chlorophylle, les prévisions éoliennes et les modèles actuels de la NOAA, ainsi que les données de chargement et déchargement de phosphore de Heidelberg University et USGS. Deux fois par semaine, lorsque la couverture nuageuse le permet, les prévisions précisent l'emplacement courant des efflorescences dans le lac Érié pendant la saison de prolifération de l'espèce, la position future projetée et l'intensité des efflorescences pour les jours suivants.

[18] Ohio Sea Grant, 2017. Winslow, C., communication personnelle.

Cet examen a relevé un projet de Toledo University qui utilise la télédétection pour caractériser les pratiques sur le terrain et cartographier les emplacements des drains. Dans ce contexte, on a signalé les résultats de deux ateliers organisés pour planifier l'avenir de la télédétection dans les Grands Lacs et conseiller la NASA sur les caractéristiques dont les futurs systèmes de télédétection devront être dotés pour pouvoir résoudre les problèmes des Grands Lacs (Shuchman et al., 2014).

Plusieurs ensembles de données sur les bassins versants, les lacs et la télédétection produits par de nombreuses organisations sont stockés et diffusés à partir de quelques bases de données clés. Mise au point au départ pour l'étude du bilan massique du lac Michigan, la Great Lakes Environmental Database (GLENDA) de l'U.S. EPA fournit des capacités de saisie, de stockage, d'accès et d'analyse de données sur la qualité de l'eau, les tissus des poissons et la composition chimique des sédiments (U.S. EPA, 2016).

Le Système d'observation des Grands Lacs (SOGL) fournit une page de données sur les efflorescences algales nuisibles (EAN) en collaboration avec divers partenaires de l'ouest du lac Érié. À cette étape initiale, la page donne accès à des données en temps réel sur les stations situées dans le bassin occidental du lac Érié (BOLE), y compris des mesures de température, de conductivité spécifique, de turbidité, de pH, de chlorophylle et d'algues bleues (cyanobactéries). Les améliorations à venir ajouteront l'accès à des données d'échantillonnage ponctuelles, à des images satellites, à des résultats de modèles hydrodynamiques et à des observations météorologiques. En plus de la page sur les EAN, le SOGL est en voie de préparer une page Web de suivi de la rivière Maumee. L'outil de suivi de cette page Web résume les charges de nutriments sur une base quotidienne pour montrer la charge totale en nutriments qui entre par la rivière Maumee dans le BOLE en cours d'année et décrit les charges cumulatives en tenant compte des résultats des années précédentes (2000-2016).

En plus des bases de données sur les Grands Lacs, des bases de données nationales contiennent également de l'information sur le bassin des Grands Lacs, dont le Water Quality Portal (WQP) maintenu par le National Water Quality Monitoring Council (NWQMC). Ce site est relié au National Water Information System (NWIS) de l'USGS, à l'entrepôt de données STOrage and RETrieval (STORET) de l'EPA et à l'ARS Sustaining The Earth's Watersheds - Agricultural Research Database System (STEWARDS) de l'USDA. Ces bases de données contiennent des informations sur la qualité de l'eau, biologiques, météorologiques et autres. Le portail de données ouvertes du gouvernement du Canada contient de nombreux ensembles de données nationales

canadiennes, y compris des données sur la qualité de l'eau recueillies dans les Grands Lacs. En outre, plusieurs autres ensembles de données nationaux peuvent être trouvés dans la base de données, y compris des données biologiques et sédimentaires.

Notre examen confirme que le bassin occidental du lac Érié (BOLE) et ses affluents sont parmi les zones les plus surveillées du bassin des Grands Lacs. La surveillance des eaux libres du lac et des bassins versants en aval est relativement robuste pour la région par rapport à d'autres parties des Grands Lacs ou à d'autres grands écosystèmes analogues. Il existe de nombreux programmes de surveillance fédéraux, étatiques/provinciaux et universitaires qui comprennent des paramètres relatifs à la charge en nutriments de sources diffuses et à ses répercussions. La disponibilité des données est passable dans l'ensemble, avec des décalages de temps dépassant généralement un an ou plus entre le moment de la collecte de l'échantillon ou de la mesure et le moment de la publication des données. Les jauges et capteurs en temps réel sont de plus en plus courants dans la région, mais ces instruments ne permettent pas de mesurer absolument tous les paramètres importants liés aux nutriments.

Aucun des programmes de surveillance actuels ne permet de reconnaître directement si le phosphore dans les affluents ou le lac provient d'engrais commerciaux ou de fumier. À l'heure actuelle, les outils de prise d'empreintes des sources de phosphore sont en grande partie au stade du développement ou de la recherche. Toutefois, comme l'indique le tableau 3-1, la plupart des principaux programmes de surveillance comprennent la quantification de différentes espèces de phosphore, notamment le PRD, ce qui est important compte tenu du fait que ce dernier est le principal paramètre du phosphore pertinent pour l'absorption biologique et les répercussions sur le lac Érié. En outre, la télédétection est couramment utilisée pour cartographier les efflorescences cyanobactériennes, mais la technologie disponible se concentre sur la détection des organismes ou des pigments végétaux (chlorophylle *a*, etc.) et des méthodes de mesure plus traditionnelles demeurent nécessaires pour mesurer les concentrations de phosphore.

3.2. Récapitulation et données manquantes

De nombreux programmes clés de surveillance et de télédétection des bassins et des eaux libres du lac sont en place pour le bassin occidental du lac Érié (BOLE). Il existe quelques bases de données pour stocker et diffuser l'information de ces programmes aux utilisateurs des Grands Lacs. En somme, ces activités aident à cerner les zones de

chargement élevé en phosphore. La télédétection, jumelée à la surveillance du lac sur place, continuera de documenter l'étendue, la composition et les caractéristiques des efflorescences algales.

Notre examen a relevé un certain nombre de lacunes et d'insuffisances sur le plan de la surveillance et il serait question de les combler pour mieux cerner les domaines prioritaires, suivre les améliorations et permettre aux modélisateurs de la qualité de l'eau de mieux prédire et comprendre la charge en éléments nutritifs et le phénomène des efflorescences algales.

La distribution spatiale et l'échelle des activités de surveillance sont souvent incohérentes ou manquantes. La couverture des zones lacustres et des bassins versants supérieurs est moindre. Les petits sous-bassins (HUC-8 ou plus petits du côté américain et tertiaires et plus petits du côté canadien) ne sont généralement pas échantillonnés de façon uniforme ou assez souvent pour pouvoir documenter les décisions de gestion (Betanzo, 2015). De plus, les conditions météorologiques et le débit des affluents sont surveillés dans un nombre limité de stations. Si cette information était disponible à une résolution spatiale plus élevée, il en résulterait une identification et une caractérisation et une modélisation prédictive plus précises des zones problématiques. L'analyse originale réalisée dans le cadre de cet examen suggère que le prélèvement d'échantillons plus grands et plus fréquents et le positionnement des jauges dans des zones présentant une distribution similaire du débit devraient être pris en compte lors de l'utilisation des données de surveillance (LimnoTech, 2017). Il arrive souvent que les concentrations soient déjà converties en concentrations moyennes pondérées, qui peuvent ensuite être utilisées pour comparer des scénarios au débit différent, entre affluents ou pour un affluent donné dans le temps (Jarvie et al., 2017).

La fréquence des activités de surveillance est souvent insuffisante pour corroborer le calcul des charges. Elle est trop faible dans de nombreuses stations pour pouvoir capter des événements importants au début du printemps ou épisodiques, et plusieurs programmes de surveillance recueillent des données peu fréquentes sur la concentration en nutriments sans qu'il ne soit question du débit. Les stations qui recueillent des données sur le phosphore seraient plus utiles si elles recueillaient des données simultanées sur le débit et prélevaient des échantillons à une fréquence supérieure à une fois par semaine (compte tenu de l'importance reconnue des précipitations qui entraînent des charges plus élevées). Les investissements dans la surveillance qui n'offrent pas une résolution temporelle suffisante pour capter les

événements de ruissellement, tels que les programmes d'échantillonnage ponctuel intermittent, peuvent être d'une valeur limitée pour soutenir la plupart des décisions de gestion.

Un financement stable pour une surveillance soutenue fait généralement défaut, les réseaux de surveillance ne sont généralement pas bien intégrés et coordonnés entre les organismes et les régions, et ils ne sont pas optimisés pour appuyer la prise de décisions en matière de gestion des ressources. À titre d'exemple, la mesure du phosphore total et du phosphore réactif dissous n'est pas toujours effectuée simultanément en raison des coûts d'analyse.

L'information sur le P dans le sol des bassins hydrographiques n'est disponible qu'à une échelle très grossière (Bruulsema et al., 2011). Il faut disposer de données sur le P avec une meilleure résolution spatiale et mieux comprendre l'étendue et les mécanismes des contributions du phosphore actuel et résiduel au lac.

Pour les eaux libres du lac Érié, les taux de réaction et les flux sont rarement mesurés. Par exemple, l'exactitude des modèles de qualité de l'eau s'améliorerait avec des valeurs empiriques et localisées pour l'appauvrissement en oxygène de la colonne d'eau, la minéralisation en phosphore, l'oxydation et l'hydrolyse du carbone et la respiration algale, ainsi que des valeurs du débit pour le calcul du taux de dépôt ou de libération du phosphore (LimnoTech, 2017).

Les instruments satellitaires sont limités à des mesures en surface, ce qui empêche de comprendre la véritable ampleur (biomasse totale) d'une prolifération d'algues nuisibles lorsque l'agitation superficielle et d'autres processus provoquent le mélange de la colonne d'eau supérieure. Les nuages peuvent également bloquer la vue sur le lac, rendant la moitié à deux tiers de l'imagerie inutilisable pour la surveillance des efflorescences algales nuisibles (Stumpf, 2014). La NASA et la NOAA travaillent à combler ces lacunes avec des instruments aéroportés qui peuvent voir les efflorescences lorsque les nuages empêchent les satellites de le faire. De plus, les aéronefs ont également été équipés de la technologie LiDAR, qui peut être utilisée pour caractériser la densité du plancton à une certaine profondeur sous la surface dans la colonne d'eau, dépendant de la clarté de l'eau.

4. Dans quelle mesure la modélisation peut-elle servir d'orientation aux décisions de gestion visant la réduction de nutriments?

Les modèles sont des outils précieux qui peuvent fournir des informations sur des systèmes complexes qui ne peuvent pas être générés à partir des seules observations sur le terrain, ainsi que faire des prédictions spécifiques sur les résultats futurs selon différents scénarios, y compris les résultats des interventions. Ainsi, les modèles peuvent guider les décisions de gestion qui pourraient dépasser la portée de l'observation directe ou de l'expérimentation. Par exemple, des modèles faisant un lien entre les charges de P fluviales et la présence d'efflorescences algales nuisibles ont permis de réduire de 40 p. 100 les exportations de phosphore provenant de la rivière Maumee et d'autres bassins versants dans le bassin occidental du lac Érié (BOLE) (US EPA, 2015).

Nous relevons quatre types de modèles pertinents pour les efflorescences algales dans le BOLE : 1) modèles d'exportation de nutriments des bassins versants qui relient les pratiques d'utilisation des terres aux charges nutritives exportées par les rivières, 2) modèles d'eutrophisation reliant les charges fluviales aux efflorescences algales; 3) modèles écosystémiques (eaux libres) qui relient les éléments nutritifs et d'autres facteurs écosystémiques aux processus écologiques lacustres et englobant de multiples composantes du réseau trophique ; 4) modèles de bilan nutritif (bilan massique) qui comparent les intrants de nutriments aux extrants (principalement le P retiré lors des récoltes et l'exportation de P par les rivières) pour estimer l'ampleur de la sur ou sous-application des engrais. Dans cette étude, nous nous concentrons sur les catégories 1) et 4), qui fournissent un aperçu des conséquences de l'épandage d'engrais passé et actuel et des pratiques de gestion des terres pour les quantités de nutriments fournies par les affluents du BOLE au lac.

4.1. Modèles de bassins versants

Onze modèles de bassins versants ont été examinés pour des facteurs tels leurs capacités hydrologiques, le phosphore et l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier, ainsi que pour leurs forces et faiblesses générales. Les détails de ces modèles sont fournis dans le Tableau 4-1, des précisions supplémentaires étant offertes dans le rapport LimnoTech (2017). La capacité de chaque modèle pour l'analyse de l'incertitude et les tests de sensibilité n'a pas été rigoureusement évaluée, mais les deux sont des considérations importantes pour la comparaison et sélection des modèles. Les modèles

sont optimisés pour des échelles et des phénomènes donnés et devraient être utilisés aux fins prévues pour simuler des événements particuliers à l'échelle du bassin hydrographique, à grande échelle et/ou des conditions continues et variables sur une période plus étendue. Deux modèles, SWAT et SPARROW, ont été les plus utilisés dans le BOLE et seront brièvement décrits, en mettant principalement l'accent sur le phosphore et en l'incluant dans la mesure du possible sous toutes ses formes (totale, particulaire et dissoute).

Tableau 4-1. Tableau comparatif de 11 modèles de bassins versants[19]

Nom du modèle	Capacités sur le plan hydrologique	Capacités liées au phosphore	Capacités liées aux engrais commerciaux et au fumier	Forces	Faiblesses
SWAT	Ruissellement de surface, écoulement de retour, percolation, évapotranspiration, écoulement des eaux souterraines. Capacités limitées des tuyaux de drainage	Devenir et transport du P minéral et organique	Program-mation et contenu des épandages d'engrais commerciaux et de fumier	Usage très répandu et accepté. Très adaptable	Cycle de phosphore relativement simple. Peu performant pour la simulation du drainage
SWATDRAIN/ DRAINMOD	Ruissellement de surface, écoulement de retour, percolation, évapotranspiration, écoulement des eaux souterraines. Capacités	Cadre exclusivement conceptuel	Applications d'engrais commerciaux et de fumier disponibles pour les espèces azotées, conceptualisées uniquement pour le	Meilleure performance hydrologique que SWAT au chapitre du drainage	Aucun cycle de phosphore adopté ou appliqué au BOLE

[19] Modèle d'évaluation du sol et de l'eau (SWAT) et sa modification pour inclure les tuyaux de drainage (SWATDRAIN / DRAINMOD) ; modèle de politique agricole/environnementale (APEX), programme de simulation hydrologique Fortran (HSPF) ; programme de simulation de chargement en C ++ (LSPC) ; Système de modélisation hydrologique (HEC-HMS) de l'USACE ; SPAtially Referenced Regressions On Watershed attributes (SPARROW) ; modèle AGRICS de pollution des sources non ponctuelles (AGNPS) ; modèle du système hydrologique européen (MIKE SHE) ; Outil canadien d'évaluation des nutriments et de l'eau (CANWET) ; LandMapR. LimnoTech, 2017 (avec des modifications à la description des faiblesses des modèles MIKE SHE et CANWET; communication personnelle avec J. Bratton).

	améliorées des tuyaux de drainage		phosphore		
APEX	Volume / débit de ruissellement de surface, écoulement souterrain, percolation et évaporation potentielle. Systèmes de drainage artificiels	Écoulement de P dissous, lessivage, minéralisation immobilisation de P et absorption de P par la culture	Très adaptable en termes de program-mation et de contenu des épandages d'engrais commerciaux et de fumier. Production et pertes de fumier	Haute résolution, paramètres et pratiques de gestion extrêmement détaillés et faciles à adapter	Paramètres difficiles à définir avec des données spécifiques
HSPF	Volume / débit de ruissellement de surface, écoulement souterrain, percolation et évaporation potentielle. Tuyaux de drainage sans capacités concrètes	Phosphore organique, soluble, sorbé et végétal. Adsorption / désorption, minéralisation, immobilisation et absorption végétale.	Capacités de program-mation grossières pour l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier. Production et pertes de fumier	Usage très répandu et accepté. Algorithmes normalisés et pas trop complexes pour l'hydrologie et la qualité de l'eau	Insuffisances sur le plan de l'adaptation de l'épandage d'engrais. Aucune simulation directe des tuyaux de drainage
LSPC	Volume / débit de ruissellement de surface, écoulement souterrain, percolation et évaporation potentielle. Tuyaux de drainage sans capacités concrètes	Phosphore organique, soluble, sorbé et végétal. Adsorption / désorption, minéralisation, immobilisation et absorption végétale.	Capacités grossières de program-mation de l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier. Production et pertes de fumier animal	Plus convivial que HSPF, tout en conservant la fonctionnalité de ce dernier en bonne partie	Mêmes insuffisances que pour HSPF. Par ailleurs, la résolution spatiale et temporelle est plus grossière et pourrait causer des limitations
HEC-HMS	Volume / débit de ruissellement de surface, écoulement souterrain, percolation et évaporation potentielle. Pas de capacités de drainage	S'occupe exclusivement du devenir et du transport de P dans les cours d'eau suivant les conditions	Pas d'intrants directs en termes d'engrais commerciaux ou de fumier	Usage très répandu et accepté. Interface graphique conviviale	Aucune allusion à la production de phosphore terrestre ni à la qualité de l'eau. Considère uniquement le devenir et le transport de P dans l'eau
SPARROW	Écoulement	Phosphore total	Intrants géospatiaux des zones	Convivial. Résultats disponibles	Résolution grossière. Ne se fonde pas sur

			d'épandage. Constantes	pour les bassins versants des États-Unis dans un outil carto-graphique disponible en ligne. Se fonde sur un grand volume de données	les processus. Manque d'extrants précis pour les nutriments et le débit
AGNPS	Ruissellement de surface, écoulement souterrain, débit des tuyaux de drainage. Ravines éphémères	Sous forme dissoute et sorbée. Les processus comprennent l'absorption par les plantes, la fertilisation, la décomposition des résidus et le transport	Program-mation et contenu de l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier	Résolution très adaptable. Capacités de ravinement éphémère quelque peu spéciales. Utile pour la simulation à long terme ou pour les scénarios d'aménage-ment des terres.	Usage peu répandu. Manque de processus nutritifs fluviaux. Ne convient pas à la simulation de conditions hivernales
MIKE SHE	Interception, évapotranspira tion, écoulement terrestre et canal, zone non saturée, zone saturée, fonte des neiges, échange entre l'aquifère et les rivières, neige, advection et dispersion. Capacités des tuyaux de drainage. Multidi-mensionnel	Phases dissoute et sorbée. La trousse optionnelle EcoLab offre une technologie de pointe pour le cyclage du P	Pas directement incorporées	Résolution et capacités très facilement adaptables. Interface graphique conviviale	Usage peu répandu (dans les Grands Lacs). Complexe, les paramètres sont difficiles à établir avec des données spécifiques. Exige des permis dispendieux
CANWET	Écoulement, ruissellement de surface et souterrain, évapotrans-piration. Couverture spatiale des tuyaux de drainage.	Phosphore total dans les eaux de surface et souterraines	Intrants spatiaux et temporels des engrais	Modèle convivial fondé sur un SIG. Ensemble « tout en un » pour confi-gurer et exécuter un modèle post-traitement	Usage peu répandu (dans les Grands Lacs). Résolution temporelle limitée. Paramètres et intrants simplifiés.

					Manque de documentation
LandMapR	Débit et voie d'écoulement des précipitations	Aucune	Aucune	Outil fondé sur un SIG pour délimiter les lieux de captage et les voies d'écoulement	Aucune composante réelle se rapportant aux bassins versants, sauf pour la topographie

4.1.1 SWAT

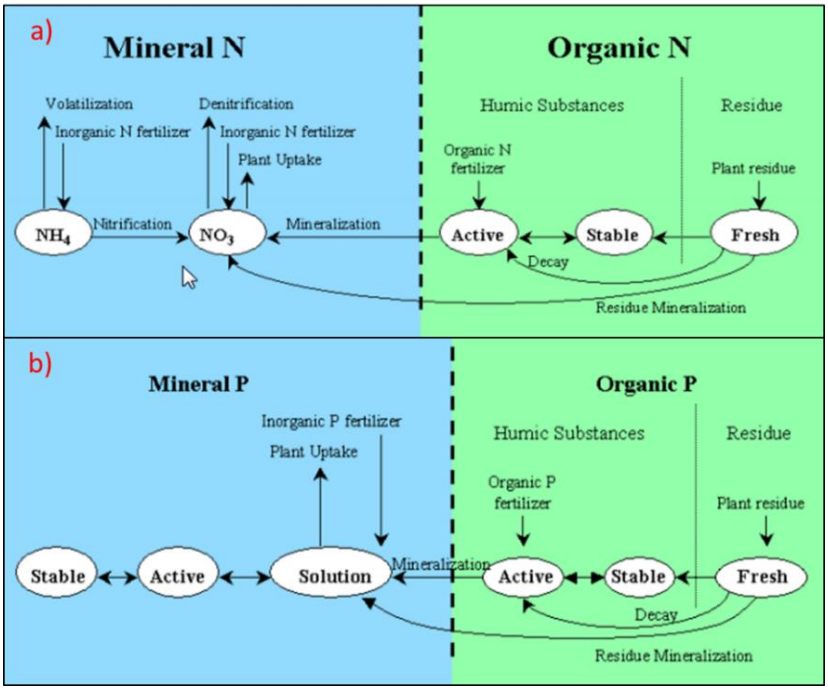
L'outil d'évaluation du sol et de l'eau (SWAT) est un modèle de simulation continue à échelle semi-empirique, semi-spatialement explicite et aux paramètres semi-répartis qui fonctionne généralement sur une base quotidienne, bien qu'une mise à niveau récente puisse lui permettre des calculs plus fréquents dans la journée. Il convient de noter que bien que les calculs soient généralement effectués chaque jour, de nombreuses applications accumulent les extrants mensuellement ou annuellement à des fins d'étalonnage. Les caractéristiques générales de SWAT comprennent la simulation de l'hydrologie des bassins versants, la charge en sédiments, la charge en éléments nutritifs, la présence de pesticides, les sources ponctuelles et le routage de l'étendue. Les caractéristiques particulières comprennent la simulation du débit de retour (c.-à-d. le volume d'écoulement provenant des eaux souterraines), des étangs, réservoirs et terres humides, l'érosion des canaux, la croissance et l'irrigation des cultures, les tuyaux de drainage, les pratiques de gestion rurales et agricoles, le calcul des charges de sédiments et nutriments provenant des zones urbaines et la simulation de bactéries et d'agents pathogènes. SWAT est un modèle non exclusif qui appartient au domaine public et qui a un code source ouvert, permettant aux chercheurs de modifier des algorithmes ou d'ajouter des processus supplémentaires à des fins de personnalisation.

Le modèle SWAT a été largement utilisé pour la modélisation des bassins versants dans le monde entier depuis de nombreuses années. L'itération actuelle du code modèle est SWAT 2012 (Arnold et al., 2012), alors que les versions précédentes (parues en 2009, 2005 et 2000) sont toutes couramment utilisées. La version actuelle de SWAT intègre des pratiques de gestion agricole aux algorithmes pour estimer la charge en nutriments et en sédiments. L'application d'engrais ou de fumier au sol est simulée dans SWAT en intégrant des informations sur le moment, le type, le volume et la profondeur de l'épandage. Le type d'engrais est défini par l'utilisateur en précisant la teneur fractionnelle en N minéral, en P minéral, en N organique, en P organique et en N minéral sous forme d'ammonium. De plus, l'utilisateur peut spécifier un contenu

bactérien pour les applications de fumier. SWAT permet à l'utilisateur de définir le calendrier d'application de l'engrais ou déterminer automatiquement quand l'engrais doit être épandu, en utilisant un seuil de contrainte pour l'azote. La figure 4-1a illustre le schéma conceptuel des processus de l'azote dans SWAT, tandis que la figure 4-1b montre ceux du phosphore.

Pour produire un modèle de travail, SWAT est étalonné en diverses étapes pour reproduire une série de données de débit journalier, hebdomadaire ou mensuel, et ensuite la concentration de nutriments (P, N et leurs fractions) et de sédiments en fonction des données disponibles. Dans le cadre de la surveillance permanente des affluents du BOLE exercée par le Heidelberg Laboratory (Heidelberg University, 2017), plusieurs chercheurs ont mis au point des modèles SWAT en utilisant une série temporelle initiale de plusieurs années pour leur étalonnage, suivie d'une validation par rapport à une série temporelle subséquente, aboutissant ainsi à des applications fortes de cette plate-forme de modélisation. Une fois calibré, un modèle SWAT peut ensuite être utilisé dans divers scénarios de simulation possibles pour recenser les endroits où les exportations de nutriments et de sédiments sont les plus importantes et explorer les conséquences des différentes pratiques de gestion des engrais.

Pour estimer les pratiques d'aménagement des terres nécessaires pour réduire de 40 p. 100 les exportations de phosphore total et de phosphore réactif dissous du bassin de la rivière Maumee, cinq modèles SWAT uniques ont été développés séparément pour ce bassin (US EPA, 2015, Scavia et al., 2017). Le projet a simulé 11 différents scénarios d'aménagement des terres, y compris l'élimination des rejets ponctuels, la conversion des terres cultivées en prairies et divers niveaux (25 à 100 p. 100) de pratiques d'ensemencement, la gérance des nutriments, le semis direct (sans labour) et l'injection souterraine d'engrais phosphorés, en tenant compte de facteurs tels une rotation diversifiée des cultures, les zones humides et les bandes tampons. Les principales conclusions de ce travail suggèrent que pour atteindre des réductions ciblées de la charge de phosphore de l'ordre de 40 p. 100, il s'agirait d'adopter à grande échelle 11 pratiques différentes ciblant les endroits où la perte de nutriments est la plus importante.



[Traduction]

a) N minéral **N organique**

Volatilisation Dénitrification Substances humiques Résidus
Engrais inorganique azoté Engrais inorganique azoté
Absorption par les plantes Engrais organique azoté Résidus végétaux

NH_4 Nitrification NO_3 Minéralisation Actif Stable Frais
Décomposition
Minéralisation des résidus

b) P minéral **P organique**

Engrais inorganique phosphoré Substances humiques Résidus
Absorption par les plantes Engrais organique phosphoré Résidus végétaux

Stable Actif Solution Minéralisation Actif Stable Frais
Décomposition
Minéralisation des résidus

Figure 4-1. Procédés conceptualisés de l'azote (a) et du phosphore (b) dans l'outil SWAT (Reproduit avec l'autorisation de Neitsch et al., 2011, © 2011 Texas Water Resources Institute)

À l'aide d'un modèle SWAT distinct des bassins versants Huron, Raisin, Maumee, Sandusky, Cuyahoga et Grand, Bosch et al. (2013) ont également conclu que des

pratiques de gestion multiples seraient nécessaires pour réduire les charges de phosphore des rivières. La modélisation a également révélé que les sous-bassins ayant des rendements de PT et de PRD élevés n'étaient pas uniformément répartis dans les grands bassins hydrographiques, ce qui suggère que les pratiques de gestion ciblant des endroits concrets seraient les plus efficaces pour réduire les charges.

Muenich et al. (2016) ont utilisé un modèle SWAT pour explorer le calendrier de réduction de la charge de phosphore dans la rivière Maumee dans le cadre de divers scénarios de gestion des éléments nutritifs et des terres. Cette analyse a révélé que même si l'épandage d'engrais devait cesser, il faudrait attendre des années pour voir des diminutions des charges de phosphore dans des conditions climatiques moyennes et des décennies si les précipitations printanières ou la fonte des neiges augmentent. Cette étude a également trouvé, en concordance avec Bosch et al. (2013), Kalcic et al. (2016) et Scavia et al. (2017), que de multiples pratiques de conservation agricole avec une mise en œuvre généralisée sont nécessaires pour obtenir des réductions cohérentes de la charge de phosphore car aucune pratique ne peut atteindre à elle seule les charges cibles chaque année. Cependant, Muenich et al. (2016) ont constaté que les charges de PRD pouvaient chuter relativement rapidement dans des conditions météorologiques moyennes, soulignant à la fois le rôle non négligeable des applications actuelles d'engrais phosphorés vis-à-vis des charges d'une année donnée ainsi que l'importance de l'hydrologie.

Les dernières années ont vu l'utilisation généralisée de SWAT pour modéliser des scénarios de réduction des nutriments et les résultats ont des ramifications importantes pour l'eutrophisation du lac Érié :
(1) Une réduction significative des charges nutritives riveraines des affluents du lac Érié exigera de multiples pratiques de conservation, y compris la gestion des éléments nutritifs, la réduction de l'épandage d'engrais et diverses pratiques d'aménagement des terres.
(2) La réduction des charges en éléments nutritifs peut prendre des années ou des décennies, les climats plus humides entraînant des délais de récupération plus longs.
(3) SWAT est un outil de modélisation précieux pour fournir des conseils concrets pour la gestion des éléments nutritifs. Heureusement, les travaux en cours visent à maintenir le cadre de modèles multiples qui a été mis au point dans Scavia et al. (2017) pour évaluer les programmes 4B (4R) de gérance des nutriments et la certification correspondante et modéliser les apports d'éléments nutritifs dans les bassins versants

des rivières Détroit et Sainte-Claire, y compris les sous-bassins des rivières Clinton, Rouge, Sydenham et Thames, ainsi que les rejets ponctuels.

Enfin, il importe de retenir deux faiblesses de SWAT (et d'autres modèles). Premièrement, comme il n'est pas possible de déterminer la fraction des nutriments à l'embouchure de la rivière qui provient des applications d'engrais récentes (0-12 mois) par rapport aux nutriments accumulés dans les sols des bassins hydrographiques depuis des décennies (P résiduel), SWAT est calibré comme si tout le P était de date récente. Cela pose aussi des problèmes avec l'initialisation du modèle, car les données pour contraindre le début de P dans le sol ne sont généralement pas disponibles à la plupart des échelles. Une deuxième faiblesse réside dans l'incapacité d'incorporer l'étendue et l'emplacement des pratiques de gestion optimales existantes en partie en raison des politiques de confidentialité en vigueur et aussi du manque d'information détaillée sur les pratiques d'épandage des engrais. Par conséquent, les scénarios modèles qui explorent les avantages d'une expansion des pratiques de conservation supposent essentiellement que la mise en œuvre actuelle est nulle ou nécessitent des hypothèses générales sur l'état et l'emplacement des pratiques existantes. Cependant, une étude récente du Conservation Effects Assessment Project (CEAP) du NCRS de l'USDA a utilisé des données d'enquête pour comparer l'étendue et les effets des pratiques de conservation existantes en 2003-2006 par rapport à 2012 et à des scénarios hypothétiques futurs, montrant les bienfaits des pratiques en cours (USDA, 2017b).

4.1.2 SPARROW

SPAtially Referenced Regressions On Watershed Attributes (SPARROW) est un modèle de bassin versant relativement simple développé par l'USGS et qui a été appliqué à la majorité des bassins hydrographiques aux États-Unis pour simuler les charges de phosphore, d'azote, de carbone organique et de sédiments. La résolution spatiale du modèle s'est améliorée ces dernières années et il peut fonctionner à l'échelle spatiale NHD+[20]. Alors que la plupart des modèles de bassins versants spécifiques aux sites sont basés sur des processus, SPARROW utilise des régressions non linéaires pour décrire le transport de contaminants à partir de sources ponctuelles et diffuses. Les concentrations, les flux et les rendements des contaminants dans le cours d'eau sont simulés en fonction des caractéristiques des bassins hydrographiques et des sources de contaminants. Ces intrants peuvent inclure le sol, l'inclinaison, l'utilisation des terres, les données du recensement, les données météorologiques, les égouts et les fosses

[20] National Hydrography Dataset Plus (NHDPlus) est un cadre national géospatial des eaux de surface qui fonctionne à une résolution de 1 :24,000 ou plus.

septiques, les pratiques agricoles et les rejets ponctuels. SPARROW permet à l'utilisateur d'estimer la contribution relative de chaque source de contaminants à l'estimation globale de la charge, et l'utilisation d'engrais est prise en compte par les données géospatiales qui définissent où les engrais commerciaux et/ou le fumier sont épandus.

Robertson et Saad (2011) ont élaboré un modèle SPARROW régional qui couvre le côté américain du bassin des Grands Lacs, ainsi que les bassins des cours supérieurs du Mississippi, de l'Ohio et de la rivière Rouge. Le modèle a une résolution spatiale assez grossière, et fonctionnait auparavant à l'échelle HUC-8, soit pour des sous-bassins d'une superficie d'environ 1,800 km^2. En se fondant sur les données saisies en 2002, le modèle a estimé que les engrais agricoles étaient à l'origine d'environ 26 p. 100 de la charge de phosphore dans le lac Érié et d'environ 30 p. 100 de l'azote livré. De plus, l'apport de toutes les pratiques agricoles (y compris les engrais commerciaux, le fumier et la décomposition de la matière organique) a été estimé à environ 58 p. 100 de la charge totale du lac Érié. Les extrants de SPARROW sur le bassin des Grands Lacs ont également servi d'élément de comparaison avec les séries de modèles simulés par Scavia et al. (2016) à l'aide de SWAT pour le bassin de la rivière Maumee dans le BOLE. SPARROW a supposé que l'épandage de fumier en amont du bassin versant était plus volumineux que celui des engrais inorganiques (Scavia et al., 2016). Un projet binational entre l'USGS, la CMI et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) est en cours et vise à peaufiner le modèle SPARROW de la région des Grands Lacs afin d'inclure également les bassins du côté canadien (CMI, 2017b).

4.2. Modèle prévisionnel des efflorescences algales nuisibles dans le bassin occidental du lac Érié

Stumpf et al. (2016) ont parachevé un modèle empirique antérieur pour prévoir la gravité des efflorescences algales nuisibles (EAN) dans le bassin occidental du lac Érié (BOLE). Le modèle utilise le débit de la rivière Maumee et la charge totale de phosphore biodisponible de mars à juillet d'une année donnée. Il inclut également un facteur de température, où les charges de juillet sont exclues des variables indépendantes lorsque la température de l'eau en juin est inférieure à 17^{o}C, soit le seuil de température pour la croissance de la microcystine. Le modèle a été utilisé pour estimer la gravité saisonnière des EAN de 2015 à 2017. Obenour et al., 2014, Bertani et al., 2016 et Ho et Michalak, 2017, ont décrit d'autres modèles et contraintes prévisionnelles analogues qui ont été appliqués dans les prévisions annuelles générales de la NOAA pour les EAN du lac Érié.

4.3 Modèles de bilan massique

Les modèles de bilan massique (équilibre nutritif, équilibre des cultures) tentent de quantifier tous les intrants et extrants principaux d'un bassin versant ou d'une autre unité spatiale, typiquement pour le phosphore (P), l'azote (N) ou le carbone (C), fournissant ainsi une estimation de l'équilibre des intrants et des extrants (Figure 4-2). Un déséquilibre peut indiquer si un élément tel que P s'accumule ou si les matières accumulées se sont épuisées. Les données nécessaires sont disponibles à divers intervalles de temps (souvent à partir des recensements agricoles tous les cinq ans) au niveau des comtés ou étatique, et peuvent être redistribuées spatialement vers les bassins versants individuels à l'aide d'un SIG. Les intrants peuvent comprendre l'épandage d'engrais, les dépôts atmosphériques et les altérations naturelles (généralement mineures et exclues) et anthropiques (déchets, détergents), qui peuvent être rapprochés des données sur la population humaine et qui sont mineurs dans les bassins versants agricoles peu peuplés. Un bilan P partiel qui compare les apports des engrais au P perdu lors des récoltes fournit donc une estimation raisonnable de l'accumulation de P dans un bassin versant.

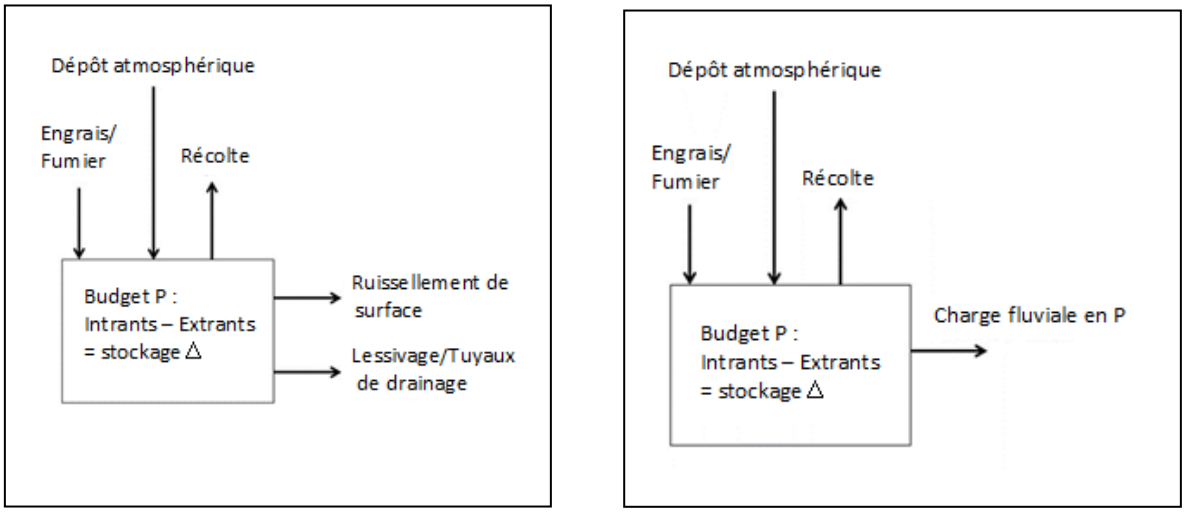


Figure 4-2. Schéma de bilan massique ou de budget P montrant les intrants et les extrants. À gauche : à l'échelle du bassin. À droite : à l'échelle réelle. Il convient de noter que cette approche conceptuelle ne relève pas explicitement les pertes de P ni le transport au niveau des eaux souterraines.

Plusieurs études ont estimé les bilans P des bassins hydrographiques du BOLE au cours des dernières décennies. Les résultats sont globalement conformes à un schéma global

décrit par Powers et al. (2016) : les bassins versants dominés par l'homme subissent une période prolongée mais limitée d'accumulation de P lorsque les apports de P dépassent la demande et le rendement des cultures, souvent suivie d'un déclin vers un équilibre quasi nul. Le déclin de l'épandage d'engrais phosphorés et une élimination accrue de P lors de récoltes, comme décrit précédemment pour le BOLE (chapitre 2), en sont les facteurs responsables. Bien que les tendances positives dans la gestion agricole ne laissent pas d'être un signe encourageant, le P accumulé au cours des années précédentes peut continuer à se mobiliser longtemps après la diminution des apports.

En étudiant les tendances de chargement du phosphore dans 18 bassins versants du lac Érié de 1935 à 2007, Han et al. (2012) ont constaté une augmentation du P excédentaire qui a culminé au cours de la période 1970-1980 avant de commencer à diminuer. L'excédent enregistré au cours des décennies précédentes s'accumulait vraisemblablement dans le bassin versant. Les études de Bast et al. (2009) et Bruulsema et al. (2011) ont également constaté une tendance à la baisse de l'équilibre entre les principaux intrants et extrants de P dans les sols de cette région, tout en précisant que ces dernières années, les chiffres réels de l'épandage d'engrais phosphorés s'étaient rapprochés de ceux des absorptions équilibrées alors que le rendement des récoltes avait augmenté (Fig. 5.3).

Selon diverses hypothèses, les estimations du bilan P pour la région en 2008 vont d'un excédent équivalent à 1 p. 100 du P retiré lors des récoltes à un déficit représentant 23 p. 100 de la quantité de phosphore éliminée par les cultures. Plus récemment, Jarvie et al. (2017) ont estimé les bilans P partiels des bassins versants Maumee, Sandusky et Raisin. Au cours des dernières décennies, le P annuel moyen appliqué aux terres cultivées a augmenté de 4 et 6 p. 100 dans les bassins hydrographiques de Sandusky et de Maumee et a montré une réduction de 11 p. 100 dans le bassin de la rivière Raisin. Au cours du même intervalle, le P annuel moyen éliminé dans les cultures récoltées a augmenté de 25 p. 100 cent dans le Sandusky et de 18 p. 100 dans les bassins versants de Raisin et de Maumee. En conséquence, le bilan P annuel moyen des terres cultivées a diminué : de 3,13 à 0,23 kg P ha^{-1} an^{-1} dans le bassin Sandusky, de 0,97 à -1,38 kg P ha^{-1} an^{-1} dans le Maumee et de -0,61 à -4,74 kg P ha^{-1} an^{-1} dans le Raisin. Enfin, comme indiqué au chapitre 2, les nouveaux calculs de LimnoTech (2017) ont montré que les taux d'épandage d'engrais en 2012 étaient en moyenne de 11 kg P ha^{-1} dans les bassins versants américains, avec un maximum de 19 kg ha^{-1} dans le bassin versant Sandusky.

Au Canada, les taux en 2007 étaient en moyenne de 16 kg ha^{-1}, avec un maximum de 26 kg ha^{-1} dans les bassins versants de la région d'Essex. Le retrait de P lors des récoltes du côté américain du BOLE (selon IPNI-NuGIS, 2012) varie d'environ 11 à 22 kg ha^{-1}. Ainsi, les taux d'épandage d'engrais phosphorés sont comparables à ceux de l'élimination de P lors des récoltes. De plus, les budgets P à grande échelle actuels[21] pour les champs de l'Ohio montrent que les taux d'épandage d'engrais phosphorés peuvent se situer sensiblement au-dessus ou au-dessous du seuil de rentabilité, et s'inscrivent en moyenne dans la plage négative ou en déclin. Il importe de continuer à suivre ce problème. Par exemple, Bruulsema (2016) a montré que, bien que l'épandage d'engrais commerciaux ait été relativement stable jusqu'à la fin des années 2000 en Ontario, il a connu une augmentation générale en 2012.

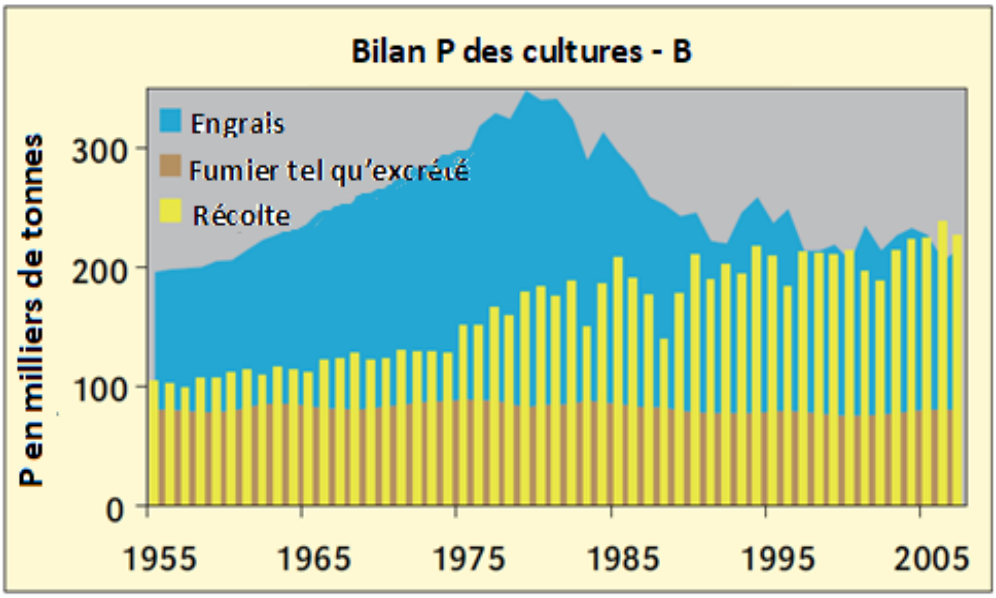


Figure 4-3. Sommaire du bilan P au fil du temps pour l'Ontario, le Michigan et l'Ohio (pour l'ensemble de l'État/de la province, pas pour l'ensemble du bassin hydrographique et à l'exclusion de l'Indiana). Il importe de signaler que seule la moitié du fumier phosphoré excrété est épandu dans les champs cultivés. (Version française adaptée du graphique reproduit dans la version anglaise de ce document avec la permission de Bast et al., 2009, © 2009 International Plant Nutrition Institute)

Pour résumer les études ci-dessus, celles qui s'occupent du budget nutritif révèlent généralement une tendance aussi forte qu'encourageante vers l'épandage d'engrais phosphorés au niveau ou en dessous du taux de retrait de P lors des récoltes, quitte à

[21] King, K., communication personnelle.

faire deux mises en garde importantes :
(1) les études à l'échelle locale révèlent une variation considérable, certains champs affichant un bilan positif et d'autres un bilan négatif [22].
(2) Même une petite « fuite » de P excédentaire peut suffire à contribuer à la prolifération d'algues, d'autant plus que les quantités de P ajoutées comme engrais et éliminées lors des récoltes sont importantes par rapport aux quantités exportées des champs. Par exemple, dans une étude d'un bassin versant dans le centre de l'Ohio, King et al. (2014a) ont estimé l'exportation de PRD par les tuyaux de drainage à 1,6 p. 100 du P appliqué aux champs, et des recherches antérieures dans l'Illinois ont indiqué un pourcentage encore plus faible dans les eaux de ruissellement. Cependant, l'exportation de P en pourcentage des intrants nets (c'est-à-dire, le P épandu avec l'engrais moins celui perdu lors de la récolte) sera évidemment beaucoup plus grande, en considérant la Figure 4-3.

Les données étatiques et provinciales disponibles dans IPNI-NuGIS (2012) sur les niveaux d'essai du sol sont cohérentes avec l'analyse ci-dessus, tel qu'indiqué précédemment (chapitre 2). Elles indiquent la persistance d'un excédent (> 50 ppm) dans 26 p. 100 des échantillons de sol prélevés dans l'ensemble de la région, ainsi qu'une tendance à la baisse de la proportion de résultats d'analyse dans cette catégorie supérieure à la catégorie optimale, les diminutions les plus importantes ayant été constatées au Michigan et en Ontario (Bruulsema, 2016).

En somme, les bilans P pour les bassins hydrographiques du lac Érié sont conformes au fait que les taux d'épandage d'engrais évoluent pour coïncider avec le volume de P perdu lors des récoltes et de nombreuses régions auraient déjà atteint cet équilibre. De plus, l'excédent de P du sol, tel qu'indiqué par les niveaux d'essai du sol, est en baisse. Ces résultats veulent dire que tandis que les concentrations de P dans le sol et le P résiduel diminuent, le P accumulé au cours des années précédentes peut encore contribuer à l'exportation fluviale de P. Si tel est le cas, une réduction supplémentaire de l'épandage d'engrais phosphorés, une augmentation de l'élimination du phosphore par la récolte et une amélioration de la rétention du P peuvent être nécessaires pour accélérer le retrait du P stocké et réduire son exportation.

[22] King, K., communication personnelle.

4.4. Récapitulation et données manquantes

Des modèles de qualité de l'eau ont été élaborés ou sont en cours d'élaboration pour une grande partie du BOLE à divers degrés de résolution spatiale et temporelle. Il existe une variété de programmes de modélisation numérique (logiciels) qui simulent le cycle agricole du P. Certains programmes sont disponibles gratuitement tandis que d'autres comportent des droits de propriété exclusive. Des superordinateurs et des grappes informatiques à grande vitesse, des réseaux à large bande passante, de grands systèmes de stockage et de sortie de données et un personnel formé sont généralement disponibles et capables d'exécuter des programmes de modélisation en mode recherche (mais pas nécessairement opérationnel) dans de nombreuses institutions de la région.

Les modèles de bassins versants, SWAT en particulier, ont permis de mieux comprendre l'ensemble des pratiques de gestion, y compris la réduction à la source, la gestion agricole et les PGO nécessaires pour réduire sensiblement l'exportation fluviale de P et atténuer ainsi les risques de prolifération d'algues nuisibles. Il importe de signaler que d'autres modèles sont disponibles pour résoudre les problèmes énoncés dans cette évaluation. Par exemple, Agriculture Policy/Environmental eXtender (APEX) est un modèle « Semi-Process » fonctionnant sur le terrain à l'échelle des petits bassins versants, et à des échelles temporelles allant du quotidien à des décennies (voir le Tableau 4-1). Le modèle peut examiner les effets des scénarios de conservation sur l'exportation de nutriments (avec une personnalisation importante des informations sur l'épandage d'engrais inorganique et de fumier), en considérant notamment le ruissellement superficiel et souterrain (Ford et al., 2015).

La modélisation des bassins hydrographiques à l'aide de SWAT se fonde sur deux grands postulats :
(1) une réduction importante des charges nutritives fluviales des affluents du lac Érié exigera une mise en œuvre étendue de pratiques de conservation multiples ;
(2) compte tenu de l'éventuelle importance du P stocké, la réduction des charges en nutriments peut prendre des années ou des décennies, des climats plus humides entraînant des délais de récupération plus longs.

Les approches SWAT et de bilan massique ont toutes deux des limites importantes. Les principaux intrants et extrants du système se fondent sur les pratiques d'épandage d'engrais et les charges fluviales actuelles, les apports de P accumulés dans les sols au cours des dernières années n'étant pas explicitement inclus (bien que les utilisateurs

puissent fixer les niveaux de phosphore du sol). En revanche, le cadre IRCE_P en cours d'élaboration au Canada (bien qu'il ne soit pas un modèle formel comme SWAT) permet de prendre en compte à la fois les accumulations de P et le degré de saturation P du sol lors du développement de la source P (Van Bochove et al.). De plus, tel que mentionné ci-dessus, l'étendue de la mise en œuvre actuelle des PGO n'est souvent pas prise en compte (en raison des limites de données), et les résultats des scénarios avec les stratégies de gestion sont en plus de tout ce qui est actuellement en place (c.-à-d. qu'ils surestiment peut-être la viabilité de ces mesures supplémentaires). Une exception notable est le récent travail du CEAP dans le BOLE, où des estimations de la mise en œuvre des pratiques de conservation en 2003-2006 et 2012 ont été utilisées dans la modélisation SWAT (USDA, 2017b).

En outre, une faiblesse commune des nombreux modèles de bassins versants (SWAT, APEX et AGNPS) réside dans une dépendance générale à l'égard des sous-programmes conçus pour mesurer le phosphore du sol dans les années 1980, qui n'ont subi que des mises à jour mineures malgré les progrès dans la compréhension de la disponibilité et du transport de phosphore. Les autres besoins cernés pour améliorer le fonctionnement du modèle comprennent la nécessité de disposer de plus d'informations sur le P (c.-à-d., caractéristiques du sol, données au-delà des tests agronomiques); les processus de transformation à la fois dans les champs et postérieurement en bordure de ceux-ci; l'incidence de l'alimentation animale, la composition chimique du fumier et la mobilisation contrôlée du phosphore; ainsi que la spéciation et la transformation du phosphore dans les champs après l'épandage du fumier, y compris la traduction des données sur le P provenant de différentes approches analytiques en paramètres du modèle (Vadas et al., 2014).

Les modèles de bilan massique et les bilans nutritionnels empiriques permettent de comprendre la relation entre les apports de P comme engrais et l'élimination du P lors des récoltes, et fournissent des preuves solides des excédents passés conduisant au stockage du phosphore dans les bassins versants et le long du réseau fluvial. Ces résultats indiquent également que les apports excédentaires en P diminuent généralement depuis plusieurs décennies et que la teneur en P décelée dans les échantillons de sol montre en règle générale des tendances à la baisse. Il s'agira donc de déterminer si ces tendances se sont maintenues au cours des dernières années et si elles se poursuivront, surtout quand on songe qu'il suffit qu'une fraction relativement faible de P soit exportée du bassin hydrographique pour contribuer aux répercussions en aval.

5. Quels autres facteurs méritent considération?

Il est largement accepté que le ruissellement de nutriments provenant de sources agricoles diffuses dans le BOLE sont la principale source de nutriments excédentaires apportés au lac et sont donc responsables des symptômes eutrophiques actuels (Scavia et al., 2014). L'eutrophisation du lac Érié dans les années 1970 a été causée en grande partie par des sources municipales et le lac s'est rétabli rapidement et considérablement après la construction d'installations améliorées de traitement de l'eau et de l'interdiction d'y déverser des détergents (DePinto et al., 1986). Au fur et à mesure que ces sources ponctuelles étaient réduites, on a cru comprendre au cours des dernières décennies que le ruissellement provenant de sources agricoles diffuses était la principale cause des efflorescences algales nuisibles du bassin occidental et de l'hypoxie du bassin central du lac Érié. Bien que l'utilisation d'engrais demeure une priorité essentielle et constitue le thème central de ce rapport, d'autres facteurs peuvent jouer un rôle en contribuant aux problèmes ou en rendant l'amélioration plus difficile. Une revue récente a mis en évidence une vingtaine de facteurs à prendre en compte comme possibles contributeurs à la prolifération des EAN dans le BOLE (Smith et al., 2015a), et plusieurs d'entre eux sont explorés plus en détail ci-dessous.

5.1. Augmentation du PRD dans le ruissellement fluvial

Pour la rivière Maumee et plusieurs autres affluents du bassin occidental du lac Érié (BOLE), des analyses détaillées des charges et des concentrations en nutriments ont été effectuées en utilisant les données de concentration journalières du phosphore, de l'azote et d'autres constituants recueillies par Heidelberg University depuis la fin des années 1970 en combinaison avec les dossiers de surveillance des rejets établis par le United States Geological Survey (USGS) (Stow et al., 2015). Les analyses des charges annuelles de phosphore et des concentrations moyennes pondérées par le débit de la rivière Maumee ont révélé des augmentations substantielles des formes de phosphore biodisponible (principalement PRD) depuis le début des années 1990, tandis que les concentrations de PT ont peu changé ou légèrement diminué (Baker et al., 2014).

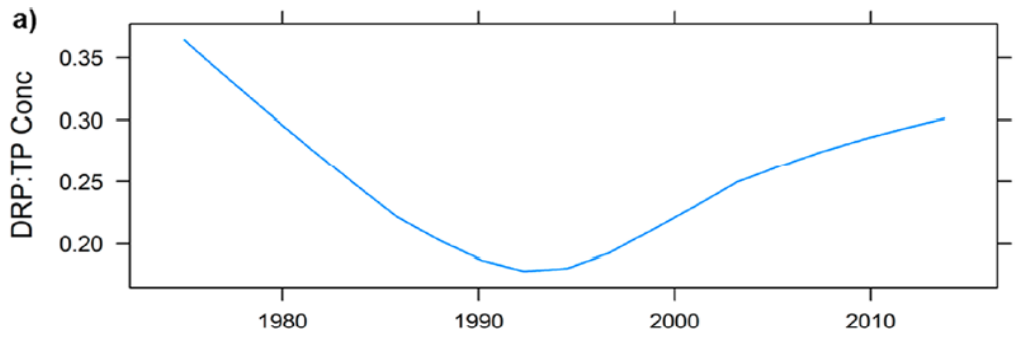


Figure 5-1. Tendance lissée à long terme pour le ratio de concentration du PRD/PT dans la rivière Maumee. (Reproduit avec la permission de Stow et al. 2015, © 2015 American Chemical Society)

Les résultats deviennent encore plus complexes par une augmentation à long terme des précipitations et donc du débit fluvial. La concentration de PT a nettement diminué de 1970 à environ 2000, suivie d'une augmentation modérée. Les charges de PT de la rivière Maumee ont également diminué jusqu'à environ 2000, mais elles ont augmenté depuis pour reprendre les niveaux de 1970, en raison d'un débit (charge = concentration x débit) fluvial plus élevé. La concentration de PRD dans la rivière Maumee a diminué à son plus bas niveau vers 1990 et a depuis augmenté, et cette augmentation du débit des rivières a conduit à des quantités encore plus importantes de PRD atteignant le BOLE. La mesure dans laquelle les autres systèmes fluviaux montrent la même tendance est incertaine. Les données de surveillance de la rivière Thames depuis 1986 montrent une diminution du PRD moyen et aucune tendance dans le PT en amont de la rivière, avec un PRD stable et un PT décroissant dans son cours inférieur (Maaskant, 2015).

En plus d'augmenter les charges de PRD dans la rivière Maumee, le ratio PRD:PT a augmenté depuis les années 1990, comme le montre la Figure 5-1. L'augmentation de la charge de PRD de la rivière Maumee coïncide en particulier avec la ré-eutrophisation du lac Érié et est une cause probable d'une recrudescence de la prolifération d'algues en raison de la plus grande biodisponibilité du P sous sa forme dissoute plutôt que particulaire (Baker et al., 2014). Plusieurs explications possibles du modèle illustré à la Figure 5-1 ont été proposées et sont examinées ci-dessous.

5.2 Phosphore résiduel

Le P résiduel désigne le P qui s'est accumulé dans le sol en raison de l'épandage d'engrais phosphorés au-delà du P éliminé au cours des dernières années. Il n'a pas de

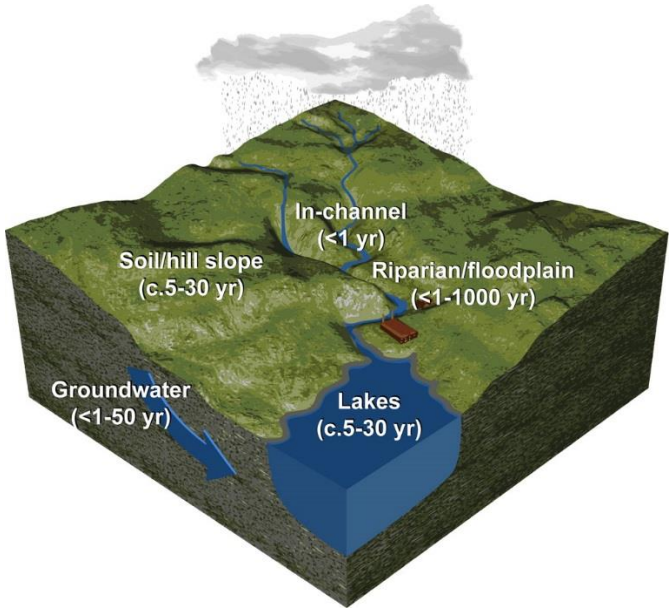
signature chimique unique[23] et, par conséquent, toute mesure déclarée de PT, PRD, etc. comprend un mélange inconnu de P appliqué récemment et de P qui aurait pu être appliqué des années ou des décennies plus tôt. L'existence du P ainsi stocké est déduite des modèles de bilan nutritionnel (Han et al., 2012, Jarvie et al., 2013, King et al., 2017, Bast et al., 2009), où un déséquilibre positif implique un stockage (Figure 4-3), ainsi que des profils P du sol (section 5.3) à mesure qu'ils changent avec le temps. L'observation que les exportations fluviales de PT ont montré une tendance à la baisse négligeable (Stow et al., 2015) alors que les applications d'engrais ont diminué et les rendements des cultures ont augmenté (chapitre 2) peut également indiquer que le P épandu dans les années et les décennies précédentes contribue à l'exportation de nutriments vers le BOLE encore aujourd'hui. On accorde de plus en plus d'attention à l'estimation du phosphore stocké dans les sols accumulés à la suite d'ajouts de nutriments passés (Réseau canadien de l'eau, 2017).

Plusieurs processus hydrologiques et biogéochimiques retardent les réactions des cours d'eau et des rivières face à une diminution des apports de nutriments et de sédiments, possiblement pendant des décennies (Hamilton, 2012). Les longs trajets associés aux voies d'eaux souterraines, souvent sur plus d'une décennie, peuvent être responsables, ne serait-ce qu'en partie. Bien qu'il soit reconnu que les voies d'eau souterraines peuvent être importantes pour le transport des nitrates des champs aux affluents, le rôle des eaux souterraines dans l'apport de P aux affluents est jugé négligeable en raison de la tendance du phosphore à s'associer aux minéraux ou aux phases amorphes des sédiments contenant de l'aluminium, du fer et/ou des composés contenant du calcium. Cependant, des preuves récentes suggèrent que le P peut être mobile dans les eaux souterraines et que celles-ci peuvent être une voie de transport importante dans certaines conditions (Holman et al., 2010, Jarvie et al., 2017, Knights et al., 2017). Peu d'études ont examiné directement le rôle de l'eau souterraine dans les charges de phosphore du lac Érié. La tendance du phosphore à s'associer aux minéraux et aux phases de sédimentation peut également donner lieu à un réservoir de P potentiellement important et échangeable dans les sols des hautes terres et dans les sédiments alluviaux et de fond, qui pourraient être libérés plus tard. Un problème supplémentaire qui n'a pas reçu autant d'attention dans le BOLE est une étude plus détaillée du P associé aux matrices organiques (par exemple la matière organique du sol), dans laquelle P peut aussi être plus stable ou disponible pour être rejeté dans l'eau du sol (Sharpley, 2006)

[23] Rappelons toutefois nos commentaires au chapitre 3 sur les recherches émergentes qui cherchent à faire la distinction entre les engrais commerciaux et le fumier comme sources.

Une indication de la disponibilité persistante du P stocké est que le PRD est mobilisé et atteint un sommet d'intensité similaire dans les pluies successives, ne montrant aucun signe d'épuisement intra-saison comme on pourrait s'y attendre d'un bassin où l'épandage est plus limité (King et al., 2017). Powers et al. (2016) ont estimé que le bassin de Maumee a accumulé plus de 200 kilotonnes de P au-delà de l'inventaire qui existait en 1970; Le rabattement de ce bassin est en cours depuis les années 1980. En modélisant le bassin versant de la rivière Maumee et divers scénarios de pratiques de conservation, Muenich et al. (2016) ont déterminé que même si l'épandage d'engrais cessait entièrement, il faudrait peut-être des années avant de voir diminuer les charges de phosphore jusqu'à obtenir l'ampleur désirée. Cette étude a également évalué les effets des réductions d'engrais sur les cultures, et a constaté que sans phosphore supplémentaire, il faudrait 25 ans pour altérer significativement le rendement des cultures, soulignant la capacité du phosphore accumulé à alimenter la croissance des cultures pendant de nombreuses années.

Le phosphore peut également s'être accumulé jusqu'à saturation dans certains terrains non agricoles tels que les zones tampons, les bandes filtrantes, les terres humides, les zones riveraines, les fossés/drains et les sédiments que l'on y retrouve, ainsi que les canaux fluviaux. Comme ces systèmes n'ont pas d'exutoire pour le phosphore par la récolte, on suppose que ces compartiments du paysage plus vaste pourraient passer des réservoirs de P à des sources de phosphore à libération lente (Jarvie et al., 2013; Dodd et Sharpley, 2015). Comme résumé par Sharpley et al. (2013), chaque type de compartiment, dépendant en partie de l'échelle spatiale, a une demi-vie ou un temps de retard de réduction du phosphore s'étendant sur des décennies et des siècles (voir la figure 5-2). L'importance relative de la charge de fond dans ces compartiments est fonction du temps de résidence et de la zone effective, de sorte que les réservoirs de sol ou de sédiments plus grands qui peuvent être mobilisés avec le temps sont des sources plus importantes que les réservoirs plus petits. Le rôle et le comportement du P résiduel dans des systèmes comme celui-ci est un domaine de recherche active, et est également en grande partie en dehors des considérations de gestion et de politique actuelles.



[Traduction]
Dans les canaux (< 1 an)
Sol/inclinaison (5-30 ans)
Zone riveraine/plaine inondable (< 1-1000 ans)
Eaux souterraines (< 1-50 ans)
Lacs (5-30 ans)

Figure 5-2. Échelles temporelles typiques pour la rétention et le recyclage de phosphore (P) dans les bassins et cours d'eau où il s'est déjà accumulé. Il en résulte une libération chronique du P résiduel, ce qui altère la qualité de l'eau en aval pendant des années, des décennies, voire des siècles. (Reproduit avec la permission de Jarvie et al., 2013, © 2013 American Chemical Society).

Bien que le P stocké dans des terrains non agricoles puisse être difficile à traiter, le P résiduel dans les sols agricoles peut être traité avec les 4B (4R) et d'autres pratiques de conservation, et la croissance et la récolte des cultures permettent une élimination significative du phosphore du système. Cette approche viserait les deux principales sources de nutriments (engrais commerciaux et fumier) d'intérêt dans cette évaluation. Dans ces conditions, l'amélioration de la qualité de l'eau et la réduction à la source du P élevé du sol se situent entre quelques années et deux ou trois décennies (Hamilton, 2012, Sharpley et al., 2013). Le P stocké dans les sols agricoles pourrait être considéré comme une ressource précieuse, et les responsables de sa gestion devrait se concentrer sur la manière de contribuer au rendement des cultures tout en réduisant autant que possible les pertes lors du transport et en diminuant le P stocké par l'absorption et la récolte. Un tel effort exigerait une collaboration plus étroite entre les chercheurs, les

conseillers agricoles et les agriculteurs pour cerner les zones où cette approche pourrait s'avérer particulièrement fructueuse (Sharpley, 2016).

5.3 Des pratiques agricoles qui changent

Alors qu'environ un tiers de l'augmentation de la charge de PRD de la rivière Maumee après 2002 était attribuable à des volumes de ruissellement plus élevés, l'augmentation restante d'environ 65 p. 100 doit être attribuée à d'autres causes (Jarvie et al., 2017). Deux explications possibles ont fait l'objet de nombreuses discussions : la conversion des terres en systèmes de culture sans labour ou avec un minimum de labour, permettant l'accumulation potentielle de fractions labiles de P dans la surface du sol et le développement de macropores dus à la décomposition des racines; et l'installation de tuyaux de drainage supplémentaires, augmentant ainsi l'efficacité du ruissellement comme voie de transport. Ces pratiques agricoles ont augmenté ou sont demeurées courantes au fil des deux dernières décennies (bien que les tendances en ce qui a trait à l'installation de tuyaux de drainage ne soient pas facilement documentées), coïncidant avec l'augmentation des exportations de PRD et l'apparition d'efflorescences algales. Il importe de noter qu'en plus de l'absence de labour et de drainage, on estime que 20 autres facteurs contribuent à l'augmentation de la prolifération des algues, y compris le compactage accru du sol, la diminution de la matière organique du sol, les horaires et les méthodes d'épandage, l'augmentation de précipitations intenses et la taille plus grande des exploitations, entre autres (voir la section 5.6) (Smith et al., 2015a).

5.3.1 Systèmes de culture au semis direct (sans labour)

L'agriculture à labour réduit et sans labour, destinée à réduire la perte de sédiments et de particules P due à l'érosion, a très bien réussi à réduire les charges de PT (Dodd et Sharpley, 2015). Cependant, les effets du labour réduit sur la distribution verticale du phosphore ont posé de nouveaux problèmes. Le labour réduit entraîne une accumulation de P dans la couche supérieure du sol, qui est alors plus disponible pour le transport (Kleinman et al., 2015). En outre, le labour réduit ou nul permet la formation et le maintien de macropores du sol qui shuntent ou court-circuitent efficacement le P de la surface élevée vers les voies de transport du sous-sol, à savoir les tuyaux de drainage (Smith et al., 2015b). En combinaison avec le changement climatique, les concentrations élevées de P en surface augmentent la probabilité d'une augmentation des pertes en phosphore, en particulier sous forme dissoute (Kleinman et al., 2015). Les pratiques de conservation telles que les 4B (4R) et autres sont les plus susceptibles d'atténuer l'impact du labour en facilitant la perte de P par les drains

souterrains tout en maintenant les avantages du semis direct pour réduire la perte de P dans les eaux de ruissellement (Kleinman et al., 2015).

5.3.2 Tuyaux de drainage

Les drains artificiels souterrains sont une composante essentielle de la production agricole dans les sols mal drainés, dont beaucoup sont présents dans le Midwest américain et le sud de l'Ontario. En règle générale, les champs agricoles obtiennent plus de drainage souterrain grâce à l'installation de tuyaux perforés faits principalement de polyéthylène haute densité (PEHD) qui peut avoir un diamètre de 76 à 152 mm (3 à 6 pouces). Les tuyaux en PEHD de petit diamètre sont posés de façon systématique sur tout le champ ou uniquement à certains points humides du champ. Ils peuvent être drainés dans un fossé de drainage de surface en bordure du champ ou dans un tuyau principal plus grand. Aux États-Unis, ces tuyaux sont généralement installés à des profondeurs de 3 à 4 pieds pour les sols de perméabilité modérée à très faible et sont espacés de 35 à 130 pieds (Wright et Sands, 2001). Dans les sols plus froids et moins profonds du Canada, les tuyaux sont généralement placés à des profondeurs de 60 à 90 cm (2 à 3 pieds) avec un espacement de ~ 7,5 à 18 m (25 à 60 pieds) [24].

Les tuyaux de drainage sont utilisés pour abaisser la nappe phréatique et éliminer l'excès d'eau après des périodes de précipitations ou de fonte des neiges. Leur installation permet aux producteurs de maintenir l'accès au champ et d'améliorer la survie des plantes grâce à une aération accrue des racines. Ces tuyaux peuvent également transporter une quantité importante d'écoulement des champs plats ou presque plats qui sont communs dans une grande partie du bassin occidental du lac Érié (BOLE). Un examen de la documentation sur les tuyaux de drainage à l'appui d'une étude de modélisation SWAT de l'Indiana a révélé que leur débit atteignait en moyenne l'équivalent de 23,2 p. 100 des précipitations annuelles dans les champs drainés (Boles et al., 2015), des valeurs supérieures à 50 p. 100 ayant été mesurées dans l'Ohio (King et al., 2014a).

Il existe peu de données permettant de quantifier les tendances actuelles du drainage souterrain dans le BOLE. La récente évaluation du projet CEAP de l'USDA fait état d'une augmentation des superficies drainées de 3,4 à 3,8 millions d'acres dans la partie américaine du BOLE en comparant les conditions de 2003-2006 et de 2012, mais les taux de drainage ont légèrement diminué par acre (USDA, 2017b). Des preuves anecdotiques suggèrent un intérêt pour un espacement plus serré des rangées de tuyaux. Toute

[24] Joosse, P., AAFC, communication personnelle, 2017

augmentation de l'étendue ou de la densité des tuyaux augmentera probablement la fraction du ruissellement qui se déplace dans le système de drainage. Depuis 2008, les modifications apportées à l'article 179 du code fiscal américain ont également modifié les taux d'installation en ajoutant une « prime d'amortissement » qui a permis aux producteurs d'amortir plus rapidement les principaux achats, y compris les nouvelles installations de drains. Les données sur l'étendue du drainage artificiel pourraient être plus complètes au Canada, avec une évaluation ontarienne indiquant que près de 30 000 km (19 000 milles) de nouveaux tuyaux sont installés chaque année (Pearce, 2011).

Alors que le phosphore n'était pas traditionnellement considéré comme se prêtant au transport par tuyaux en raison de l'adsorption du sol, des recherches récentes ont indiqué le contraire. Christianson et al. (2016) ont examiné plus de 400 publications sur le drainage agricole provenant de divers endroits aux États-Unis et au Canada. Les charges de phosphore dissous et particulaires provenant des sites de drainage souterrains se sont révélées généralement inférieures à 1 kg-P/ha par année, ce qui concorde avec les résultats des études en bordure de champ de l'Ohio (King et al., 2014a). Le phosphore total perdu dans l'eau de drainage des tuyaux était inférieur à 4 p. 100 de la quantité épandue dans 90 p. 100 des cas. Comme indiqué au chapitre 2, aucune différence significative n'a été observée entre l'épandage d'engrais commerciaux et organiques en termes de perte de P par rapport au drainage souterrain. Les parcelles sans labour avaient une charge de phosphore dissous plus élevée (médiane de 0,12 kg-P/ha) que celle trouvée avec d'autres parcelles de conservation et de labour conventionnel (médiane 0,04 kg-P/ha), ce qui concorde avec les autres résultats publiés. King et al. (2014b) ont évoqué de multiples études montrant que le transport du phosphore sous la surface était plus important avec le semis direct qu'avec le labour conventionnel. Cela peut être attribuable au fait que les parcelles sans labour ne subissent pas de mélange de phosphore dans le profil de sol associé au labour et que les macropores verticaux qui se développent sur plusieurs saisons sans labour offrent des possibilités accrues d'écoulement préférentiel vers les tuyaux. Des études sur de petites parcelles dans l'Ohio (King et al., 2014a) et en Ontario (Zhang et al., 2017) ont révélé que les concentrations de phosphore total dans les coulées peuvent être encore plus élevées à certains endroits.

Le P transporté à travers les tuyaux de drainage peut être un contributeur important à la prolifération d'algues. La recherche de Smith et al. (2015b) sur les champs agricoles dans le bassin versant de la rivière Saint-Joseph ont montré une réponse hydrologique

rapide des drains (semblable au ruissellement de surface) et ont signalé qu'environ 50 p. 100 des charges (PRD et PT) se produisait au moyen des tuyaux de drainage. Kane et al. (2014) ont montré que les apports de PRD de la rivière Maumee stimulent directement la croissance de la biomasse algale dans le BOLE, de sorte que le lien entre le PRD émanant des drains et la prolifération des algues du lac Érié peut être très direct.

L'adoption de pratiques 4B (4R), y compris le placement souterrain, peut réduire les pertes de phosphore dans une certaine mesure, mais des pratiques de conservation supplémentaires sont nécessaires (Kleinman et al., 2015). Les études en bordure des champs ont également trouvé des résultats positifs de la mise en œuvre des pratiques 4B. Williams et al. (2016) ont étudié l'effet de la mise en place sur le débit des macropores et le transport du phosphore vers les drains. Les résultats indiquent que l'incorporation d'engrais phosphatés appliqués en surface, par opposition à leur abandon sur la surface d'un champ sans labour, a réduit de 45 p. 100 la concentration de P dissous dans le ruissellement des tuyaux. King et al. (2017) ont également constaté dans plusieurs études sur le terrain du lac Érié que l'approche 4B a réduit les pertes de phosphore dans les eaux de ruissellement et dans le drainage souterrain. À l'heure actuelle, cependant, alors que certaines études suggèrent un rôle important pour les pratiques 4B, des questions demeurent sur leur efficacité à améliorer la qualité de l'eau dans une plus grande variété de bassins versants en ce qui a trait au phosphore (Christianson et al., 2016) et à l'azote (Christianson et Harmel, 2015a) et il est manifeste qu'il s'agit d'un domaine où des recherches continues sont nécessaires.

5.4. Ratios des nutriments

Un autre aspect méritant considération est le rapport des éléments nutritifs dans les engrais. Les ratios azote/phosphore sont variables dans le fumier, comme indiqué brièvement au chapitre 2 (p. ex., ils sont généralement plus faibles dans la litière de volaille que dans le fumier de porc), mais inférieurs au rapport approprié pour les principales cultures de céréales et de foin. Par conséquent, chercher à répondre aux besoins des cultures en azote en se contentant d'appliquer du fumier peut conduire à une application excessive de phosphore. Par ailleurs, si les agriculteurs restreignaient l'application de fumier au P que demandent les cultures, il y aurait un déficit de N, nécessitant une application supplémentaire d'engrais commerciaux (Sharpley et Jarvie, 2012). En général, l'épandage d'engrais avec des rapports azote : phosphore différents [25] et des processus de transformation et de transport subséquents qui affectent certaines formes nutritives mais pas d'autres (p. ex., perte de PRD par liaison au sol, perte de N

[25] Les engrais inorganiques peuvent avoir des ratios N:P inférieurs; voir p. ex. Rehm et al. 2002.

par dénitrification) peuvent mener à des ratios P:N différents dans le BOLE, y compris dans les affluents et dans le lac Érié proprement dit (Prater et al., 2017). Les expériences de laboratoire et de terrain indiquent que les ratios d'éléments nutritifs - voire les concentrations d'azote à elles seules dans certaines conditions - peuvent être importants dans la dynamique cyanobactérienne du lac Érié, notamment pour la prolifération des efflorescences, la production de toxines et les changements dans les populations d'espèces (Chaffin et al., 2011, Davis et al., 2015).

5.5. Changements climatiques

La charge de phosphore apportée par les rivières au lac Érié est régie par la concentration et le débit, et comme le débit varie beaucoup plus que la concentration, les années de fortes précipitations et de crues sont aussi des années de fortes charges de phosphore. C'est la base pour les modèles prédisant la gravité des efflorescences algales nuisibles (EAN) dans le BOLE au cours d'une année donnée (Stumpf et al., 2012). Le fléau de 2011, qui était un record à l'époque, s'est produit à la suite de conditions météorologiques qui ont produit des charges d'éléments nutritifs sans précédent et du ruissellement d'une série de lourdes précipitations entre la fin de l'hiver et le début de l'été. Les prévisions climatiques suggèrent que des précipitations printanières similaires pourraient devenir plus fréquentes à l'avenir (Michalak et al., 2013). Il est donc important de considérer les effets des conditions climatiques futures pour le ruissellement des nutriments.

L'analyse des tendances saisonnières et à long terme du bassin versant de la rivière Maumee a révélé que les précipitations moyennes mensuelles étaient relativement stables entre 1975 et la fin des années 1980, diminuaient quelque peu au début des années 1990, puis augmentaient graduellement depuis le milieu des années 1990 jusqu'à la fin de la période record. (Stow et al., 2015). Cette tendance des précipitations s'est surtout reflétée dans les tendances d'écoulement de la rivière Maumee qui, surtout, ont montré une forte tendance à la hausse entre le milieu des années 1990 et la fin de cette période record. Les relevés de la qualité de l'eau ont montré une diminution constante des concentrations de phosphore total entre le milieu des années 1970 et 2000 environ avant d'augmenter légèrement, de sorte que les concentrations de PT étaient inférieures d'environ 20 à 30 p. 100 à la fin de la période (Stow et al., 2015). Les concentrations de phosphore réactif dissous (PRD) ont montré la diminution et l'augmentation subséquente, tel qu'illustré à la figure 5.1. Cependant, la tendance des rejets a fortement influencé l'exportation fluviale, bien que les tendances de concentration de PT et PRD se

soient terminées à des points plus bas qu'au début de leurs relevés respectifs, leurs charges au lac étaient aussi élevées ou plus élevées à la fin qu'au début de la période visée. Dans une autre analyse des tendances de la rivière Maumee, Jarvie et al. (2017) ont conclu qu'environ le tiers de la charge accrue de PRD de la rivière Maumee depuis 2002 était attribuable à des volumes de ruissellement plus élevés.

Une tendance continue à l'augmentation du débit fluvial complique considérablement la capacité de gestion des éléments nutritifs à atteindre les objectifs fixés. Comme Stow et al. (2015) le font remarquer, si cette augmentation se poursuit à l'avenir, elle peut faire obstacle à l'atteinte des charges de P ciblées, même si les stratégies de réduction du phosphore sont couronnées de succès. Ainsi, l'obtention de réductions substantielles de la charge de phosphore peut nécessiter une diminution persistante des concentrations de phosphore pour compenser l'augmentation du débit. Une application SWAT a montré que les charges de P diminueraient sensiblement dans quelques années en réponse à l'arrêt de l'épandage d'engrais sous un climat modéré, mais une telle réponse pourrait prendre des décennies dans un futur climat plus humide (Muenich et al., 2016). Il est donc préoccupant que des études dans le bassin du lac Érié aient prévu des précipitations accrues au cours du XXIe siècle. Une simulation climatique par Michalak et al. (2013) a indiqué que les précipitations dépassant 20 mm devraient augmenter d'environ 50 p. 100 et que la fréquence des événements dépassant 30 mm devrait doubler. L'importance de l'exportation de P à partir des bassins versants fondée sur les événements attire l'attention sur la nécessité de mieux comprendre l'efficacité des pratiques de gestion lors de précipitations extrêmes de courte durée, par opposition aux conditions moyennes (Réseau canadien de l'eau, 2017). Il importe de noter que les projections climatiques pour la région demeurent incertaines (y compris les changements potentiels des précipitations saisonnières) et certaines études récentes ont indiqué que plusieurs facteurs (p. ex., évaporation accrue, croissance des plantes) pourraient entraîner des changements minimes ou même diminuer les rejets et/ou les exportations de P dans la région au cours de ce siècle (par exemple, Cousino et al., 2015, Verma et al., 2015, Culbertson et al., 2016, Pease et al., 2017). Enfin, en plus d'affecter les charges, le changement climatique peut influer sur la prolifération d'EAN par d'autres moyens, notamment par des températures de l'eau généralement plus chaudes et en exerçant des effets sur la stratification des lacs (Watson et al., 2016).

5.6 Autres facteurs

Smith et al. (2015a) ont résumé d'autres facteurs susceptibles de jouer un rôle dans la prolifération des EAN dans le BOLE depuis la dernière décennie. Les facteurs spécifiques aux activités agricoles incluent des rotations des cultures de maïs ou de maïs-soja potentiellement accrues pour la production de biocarburants, bien que les données sur les superficies récoltées pour cette évaluation n'indiquent pas de changements majeurs jusqu'en 2012 (LimnoTech, 2017); des changements dans la source d'engrais au milieu des années 1990 vers des formes qui sont potentiellement plus disponibles pour la perte, et qui peuvent être plus difficiles à appliquer en plus petites quantités; un plus grand épandage d'engrais pendant la saison de non-croissance; et les problèmes d'analyse et de test du sol, y compris le recours aux tests du sol avant l'adoption répandue du labour de conservation, et l'absence d'approches normalisées pour l'analyse et les rapports dans les laboratoires (Smith et al., 2015a).

5.7 Récapitulation et données manquantes

Comme seulement environ le tiers de l'augmentation de la charge de PRD de la rivière Maumee est attribuable à des volumes de ruissellement plus élevés, les deux tiers de cette augmentation doivent être attribués à d'autres causes. L'adoption généralisée des systèmes de culture sans labour et de labour minimal peut avoir contribué à ce que le phosphore s'accumule dans la surface du sol et permette aux macropores de se développer et de transporter les éléments nutritifs dissous jusqu'aux couches souterraines. Les tuyaux de drainage contribuent également en augmentant l'efficacité du transport d'écoulement. Les deux pratiques ont continué à être couramment utilisées au cours des deux dernières décennies (bien que les tendances en ce qui a trait à l'installation des tuyaux de drainage ne soient pas facilement documentées), coïncidant avec l'augmentation des exportations de PRD et la prolifération d'algues.

Les pratiques du semis direct (sans labour) et du drainage par tuyaux offrent des avantages palpables et les deux interagissent de manière complexe. Le semis direct assure le contrôle de l'érosion, réduit les pertes de phosphore et le ruissellement, ce qui limite le transport de phosphore et de sédiments provenant des champs agricoles. Il est particulièrement important lors des fortes précipitations, lorsqu'une grande partie du phosphore est perdue. En même temps, il peut permettre une infiltration plus importante du P dissous dans les drains souterrains par un écoulement préférentiel, ou peut stratifier les sols avec des systèmes d'engrais diffusés. Quant aux tuyaux de

drainage, ils peuvent permettre une plus grande distribution des charges de PRD des champs vers le système de cours d'eau. Les tuyaux peuvent par ailleurs réduire les quantités de ruissellement de pointe attribuables à des conditions d'humidité antécédentes plus basses et à une meilleure santé du sol, et peuvent permettre une meilleure gestion du PRD par le contrôle de l'eau drainée. Les améliorations apportées à ces pratiques peuvent inclure de nouvelles adaptations de la méthode du semis direct, telles que l'injection souterraine d'engrais, les cultures de couverture et autres, et de nouvelles adaptations des tuyaux de drainage, telles que la gestion des eaux de drainage, les entrées aveugles, les lits filtrants de phosphore et autres.

De grandes quantités de P appliquées au cours des années précédentes se sont accumulées dans les sols des bassins versants et dans les sédiments des plaines inondables et des rivières au cours des années d'épandage excessif d'engrais. Un certain abaissement de ce P résiduel dû à l'absorption des plantes semble être en cours, et l'importance de sa contribution aux charges fluviales actuelles est incertaine.

La perspective de futures augmentations potentielles des précipitations et du ruissellement pose un sérieux défi pour atteindre les cibles de charge de phosphore en raison de l'influence disproportionnée du débit de la rivière sur les charges. Les modèles indiquent que la réduction des charges fluviales de P peut se produire dans un court laps de temps de peut-être quelques années sous des climats modérés et l'adoption généralisée d'un mélange de pratiques de gérance des nutriments. Un climat plus humide, conjugué à la possibilité de libérer lentement le P stocké dans les sols des bassins versants, pourrait se traduire par une récupération exigeant plusieurs décennies.

Des recherches plus poussées sont nécessaires pour mieux comprendre l'incidence de ces autres facteurs sur la perte de phosphore. Les progrès dans la compréhension des sources et des voies de livraison du PRD et son incidence sur les proliférations d'algues dans le BOLE devraient aider à confirmer son importance par rapport aux autres formes de phosphore. Il importe également de mieux comprendre comment réduire les pertes de P et tirer meilleur parti de ce qui est en fait une ressource précieuse pour les agriculteurs. De nouvelles approches pour comprendre divers phénomènes sont nécessaires en ce qui concerne les ratios variables d'azote et de phosphore dans le fumier par rapport aux engrais commerciaux et l'application potentielle d'engrais en fonction des besoins en azote; toute augmentation potentielle de l'épandage (qu'il s'agisse d'engrais commerciaux ou de fumier) durant les mois les plus froids, lorsque les

champs peuvent être dépourvus de couvert végétal; les changements dans la forme des engrais commerciaux pouvant augmenter la disponibilité de P; et des protocoles de recommandation d'essais de sol et de fertilisation obsolètes et non standardisés. De nombreux facteurs détermineront si les cibles actuellement établies pour les charges sont réalisables dans un délai raisonnable, et les climats futurs en particulier peuvent aboutir à des résultats difficiles à prévoir aujourd'hui, sans parler d'autres défis de taille qu'il faudra peut-être relever pour atteindre ces cibles.

6. Conclusions et recommandations

Une grave eutrophisation du lac Érié dans les années 1960 et 1970 a mené à des stratégies de contrôle du phosphore qui s'attaquaient principalement aux sources ponctuelles qui réduisaient considérablement les charges de PT, les concentrations de P dans les eaux libres du lac et la biomasse algale. La santé du lac Érié n'a été rétablie que pour faire face à de nouvelles menaces depuis les années 1990, comme en témoignent la fréquence et la gravité accrues des nuisances et des efflorescences algales nuisibles dans le bassin occidental du lac Érié (BOLE) ainsi que l'hypoxie de son bassin central. Ce rapport analyse des données et la documentation récente pour explorer le rôle des engrais commerciaux et du fumier dans la réapparition de l'eutrophisation dans le BOLE.

Certaines tendances en matière d'épandage d'engrais, qui durent maintenant depuis plus d'une décennie, sont encourageantes. Les apports d'engrais phosphatés diminuent tandis que l'élimination du phosphore par les cultures a augmenté et les déclins de P dans le sol, du moins dans certains endroits, suggèrent que la fertilisation au niveau ou au-dessous des besoins des cultures et le retrait du phosphore stocké sont viables sans que ce soit au détriment du rendement des récoltes. Des modèles tels que SWAT offrent un aperçu de la combinaison de pratiques d'aménagement des terres et de gestion des éléments nutritifs susceptibles d'être les plus efficaces pour amener les charges de phosphore à un niveau où les efflorescences algales extrêmes deviendront des événements rares. Ce rapport fournit une évaluation complète des pratiques d'épandage d'engrais dans le BOLE et, ayant fait une synthèse des documents les plus récents, il décrit les besoins de recherche ainsi que les aspects de la gestion des terres et des éléments nutritifs qui nécessitent une attention particulière. Le lac Érié a bénéficié d'une action audacieuse par le passé et exige aujourd'hui des mesures tout aussi audacieuses pour protéger sa santé et sa valeur pour les habitants du bassin.

Ce rapport fait valoir également la nécessité de mieux comprendre les processus fondamentaux, d'améliorer la surveillance pour combler les lacunes critiques et d'approfondir la recherche et la modélisation des approches de gestion des terres et des éléments nutritifs nécessaires pour garantir que les engrais épandus répondent aux besoins des cultures sans contribuer à une prolifération excessive des efflorescences algales ni à d'autres répercussions environnementales dans les écosystèmes aquatiques en aval.

6.1 Constatations sur l'épandage d'engrais dans le BOLE

1. Il n'existe en ce moment pas de méthodes analytiques ou d'évaluation des données établies pour faire la distinction entre les charges de P émanant des engrais commerciaux et celles attribuables au fumier au point de livraison des affluents au lac, et on ne peut établir de lien de causalité entre différentes sources de P appliquées aux champs et la réaction des algues dans le BOLE. Par conséquent, les ventes d'engrais commerciaux, la production de fumier et les informations sur l'épandage doivent être utilisées comme indicateurs de l'incidence relative de chaque principale source d'engrais, sous réserve de préciser que les politiques de confidentialité en vigueur limitent l'accès aux données et aux informations sur les exploitations.
2. Selon les données binationales comparables les plus récentes (2006-2007), on estime que la valeur annuelle des engrais commerciaux épandus et du fumier produit et épandu, confondus et convertis en P élémentaire, s'élève à un total de 41 687 tonnes (72 p. 100) pour le bassin hydrographique des États-Unis et à 16 327 tonnes (28 p. 100) pour celui du côté canadien. Cet écart rejoint celui qui existe entre la superficie des deux bassins.
3. Les engrais commerciaux sont la principale source de phosphore utilisée à des fins agricoles dans l'ensemble du BOLE (72 p. 100 d'engrais commerciaux et 28 p. 100 de fumier produit par le bétail). Selon des comparaisons effectuées en 2006, bien que l'usage des engrais commerciaux l'emporte sur le fumier (81 p. 100 contre 19 p. 100) aux États-Unis, au Canada, ce sont des sources plus ou moins comparables (52 p. 100 de fumier contre 48 p. 100 d'engrais commerciaux).
4. Le fumier représente environ 20 à 30 p. 100 du P total appliqué dans le secteur agricole ou produit dans la zone d'étude, mais la concentration localisée des sources et de l'épandage augmentent le pourcentage relatif dans certains endroits et dans l'ensemble pour la portion canadienne du BOLE.

5. Le cheptel est demeuré passablement constant au fil du temps dans le bassin mais, selon une approche estimative, le nombre de têtes aurait augmenté du côté des États-Unis jusqu'à la fin de 2012 et on dénote une tendance à concentrer davantage d'animaux par ferme. Les informations sur les parcs d'engraissement du bétail (CAFO) des États-Unis sont du domaine public, quoiqu'elles ne soient pas faciles à colliger; quant au Canada, cette évaluation a eu de la difficulté à trouver des données sur les exploitations d'élevage.
6. Bien que les études soient limitées, aucune tendance générale vers une plus grande perte de phosphore provenant de champs, où l'on aurait épandu des engrais commerciaux par opposition à du fumier, n'a été documentée. Les taux de pertes ont tendance à avoir une corrélation plus étroite avec d'autres facteurs, en particulier avec la gestion des éléments nutritifs sur le terrain, plutôt qu'avec le type d'engrais épandu.
7. Les tendances agricoles importantes comprennent l'augmentation progressive des rendements avec une diminution progressive de l'épandage d'engrais et une réduction globale des engrais à un niveau égal ou inférieur aux besoins des cultures; le phosphore résiduel accumulé de l'épandage excessif des années précédentes pourrait compenser la différence lorsque l'épandage de l'année est insuffisant par rapport aux besoins des cultures.
8. Les données de surveillance de plusieurs affluents du BOLE indiquent une tendance croissante des charges de phosphore réactif dissous (PRD) depuis les années 1990, alors que les charges de phosphore total (PT) ont peu varié. Étant donné que le PRD est considéré hautement biodisponible, cette augmentation est largement perçue comme un facteur important de la prolifération d'algues dans le bassin occidental du lac Érié et des vastes zones hypoxiques de son bassin central observées depuis les dernières années.
9. L'évolution des pratiques agricoles parallèlement à la fraction croissante de PRD dans les charges fluviales du PT depuis les années 1990 suggère un lien entre les efflorescences algales et l'augmentation du PRD. Comme cette augmentation ne s'est pas accompagnée d'une utilisation accrue d'engrais, d'autres facteurs peuvent en être responsables. Deux ont particulièrement retenu l'attention : L'adoption généralisée de pratiques de labour de conservation (en particulier le semis direct) a vraisemblablement entraîné une accumulation de P à la surface du sol, contribuant aux pertes de surface et au développement de macropores (formés par des racines qui se décomposent dans le sol non labouré) peut causer une augmentation du P exporté par les tuyaux de drainage souterrains. Ces tuyaux augmentent le transport à travers

les voies souterraines, et bien que leur étendue ne soit pas bien quantifiée, il est manifeste qu'ils sont de plus en plus répandus.

10. Les charges de phosphore sont le produit des concentrations dans l'eau et de l'écoulement fluvial. Bien que les concentrations de P aient quelque peu diminué, les charges de phosphore sont demeurées stables ou ont augmenté en raison du ruissellement plus intense que l'on connaît depuis environ 1990. Les fortes précipitations et celles de mars à juillet produisent les plus lourdes charges de P, contribuant ainsi à une plus grande prolifération des efflorescences algales.
11. Tout semble indiquer que les ratios azote: phosphore peuvent être importants pour l'initiation, la croissance, la toxicité et la dominance des espèces d'efflorescences algales. Les ratios dans différentes sources d'engrais et de fumier sont variables; Les ratios surveillés en aval (y compris dans le lac Érié) seront fonction à la fois de ces différences à la source ainsi que des processus subséquents de transport et de transformation.

6.1.1 Données manquantes et recherches nécessaires sur les engrais

1. Les lacunes et les obstacles qui limitent l'évaluation et la modélisation des sources et des répercussions comprennent le manque de précisions sur l'épandage et la gestion des engrais commerciaux et du fumier, la résolution insuffisante des données et les politiques de confidentialité en vigueur limitant l'accès aux données et aux informations. Des recherches plus poussées sur tout écart entre les résultats des enquêtes et les recensements quinquennaux (p. ex., en ce qui a trait à l'épandage d'engrais commerciaux) seraient instructives. De plus, il importe que toutes les entités intéressées (y compris les Tribus et les Premières nations) évaluent comment améliorer la collecte de données et la prestation de services pour répondre aux questions étudiées dans le présent examen.
2. Les connaissances dans les domaines agricoles accusent d'importantes lacunes, notamment en ce qui a trait aux caractéristiques détaillées et à la dynamique de rabattement des réservoirs de phosphore résiduel provenant de l'épandage passé d'engrais phosphorés excédentaires par rapport aux besoins des cultures, à l'ampleur des réseaux de drainage et à toute l'étendue des effets de la gestion des fumiers à l'échelle locale et régionale sur la qualité de l'eau de surface.
3. Avec l'adoption croissante de pratiques optimales, notamment pour la gestion des engrais, comme dans le cadre du programme 4B (4R), des

recherches plus approfondies se font nécessaires sur l'efficacité des mesures de gestion des exportations de P sur une plus vaste échelle, au niveau des champs et de l'ensemble du bassin (études semblables au CEAP).

4. Les lacunes importantes en matière de connaissances à l'échelle de l'écosystème comprennent les contributions actuelles relatives des engrais commerciaux et du fumier ainsi que du phosphore stocké des années précédentes à la charge de phosphore qui pénètre dans le lac et sa fraction biodisponible.
5. Il existe d'importantes lacunes dans les connaissances en ce qui concerne les options de gestion les plus à même de réduire le transport du phosphore sous toutes ses formes afin qu'il demeure sur les lieux d'épandage pour l'absorption des cultures. Il faudrait trouver des moyens novateurs de réduire les pertes à la lumière de l'utilisation généralisée des pratiques de labour visant la conservation du sol (qui procurent d'autres bienfaits écologiques) et des systèmes de drainage des champs.

6.1.2 Recommandations portant sur l'épandage d'engrais et d'autres pratiques agricoles

1. Que l'on poursuive les nouvelles recherches sur la surveillance des sources de phosphore, y compris sur les isotopes stables et les empreintes phosphorées organiques dans le cadre des efforts d'attribution des sources, et la surveillance sur le terrain de la perte de P par les espèces provenant de champs recevant des quantités différentes de fumier et d'engrais commerciaux.
2. Que les organismes obtiennent des données (p. ex., des enquêtes, des ensembles de données disponibles) sur les ventes et l'épandage d'engrais commerciaux à une résolution temporelle et spatiale supérieure et qu'ils les diffusent dans la mesure où les règlements et les protocoles le permettent afin de mieux faire comprendre cette source importante.
3. Que l'on quantifie de manière plus probante tous les principaux composants de la production, de la gestion et de l'épandage du fumier sur le terrain ainsi que la perte de phosphore connexe et ses répercussions sur la qualité de l'eau de surface et les écosystèmes à l'échelle locale et régionale.
4. Que les organismes recueillent et mettent à jour régulièrement un ensemble de données binationales statistiquement représentatif des concentrations de phosphore et de la stratification verticale dans les sols agricoles (y compris des protocoles plus cohérents pour les besoins d'échantillonnage), que ce soit

dans le cadre d'un programme existant ou nouveau (dirigé par l'organisme ou de nature multipartite).

5. Que l'on améliore la résolution spatiale des données sur le phosphore résiduel (y compris pour les réservoirs dans des terrains non activement cultivés), ainsi que les liens entre les flux de phosphore provenant des réservoirs et les phénomènes lacustres, dont les efflorescences algales et l'hypoxie.
6. Que l'on soutienne la recherche et la surveillance pour quantifier et mieux comprendre les effets de la pratique agricole du semis direct sur l'accumulation de phosphore à la surface du sol et son transport à travers les tuyaux de drainage et que l'on étudie d'éventuels nouveaux moyens de réduire autant que possible les pertes de phosphore associées à cette pratique.
7. Que l'on obtienne des données plus récentes sur les réseaux de drainage et leurs effets sur le transport du phosphore, en termes de masse et de forme, ainsi que sur les interactions avec les pratiques agricoles et l'épandage d'engrais commerciaux et de fumier, et le rôle et le taux relatifs de la libération de P par les tuyaux de drainage par rapport au ruissellement de surface.
8. Que l'on continue d'évaluer les effets des changements climatiques sur les charges en phosphore des rivières en tant que facteur qui pourrait compliquer la détermination de la charge cible.
9. Que l'on continue de promouvoir les lignes directrices 4R pour l'épandage d'engrais, y compris par la sensibilisation, l'éducation et la technologie pour améliorer l'adoption et l'efficacité de ces pratiques. Il faudrait également multiplier les efforts pour évaluer l'efficacité des pratiques de gestion des 4R et des autres pratiques optimales à l'échelle des champs et des bassins versants, et cerner les domaines qu'il y a lieu d'améliorer.

6.2 Constatations sur la surveillance

1. Le bassin occidental du lac Érié et ses affluents sont parmi les zones les plus intensément surveillées dans le bassin des Grands Lacs bien qu'il y ait d'importantes insuffisances à combler.
2. La surveillance des eaux libres du lac et des bassins versants inférieurs est relativement robuste dans la région. Il existe de nombreux programmes de surveillance comprenant des paramètres relatifs à la charge de nutriments de sources diffuses et à leurs effets. La surveillance des principaux affluents de la portion du BOLE correspondant à l'Ohio se fait de manière exhaustive,

notamment pour la haute résolution temporelle et la quantification des diverses formes de phosphore (p. ex., phosphore réactif dissous, phosphore particulaire), surtout dans le cadre de programmes tels celui de surveillance des affluents de la Heidelberg University.

3. La disponibilité des données est en général passablement satisfaisante, avec des délais dépassant généralement un an ou plus pour la diffusion des données. L'usage de jauges et de capteurs en temps réel devient plus courant dans la région.
4. La télédétection est de plus en plus utilisée pour la surveillance régulière des efflorescences algales. Des recherches sont en cours concernant l'utilisation potentielle de la télédétection pour d'autres applications, y compris le recensement des tuyaux de drainage et les pratiques sur le terrain.

6.2.1 Données manquantes et recherches nécessaires en matière de surveillance

1. Des lacunes importantes sont à signaler au niveau de la surveillance dans les bassins versants et les lacs en termes d'espace, de temps et de paramètres. Les réseaux de surveillance accusent en général un manque de coordination et d'intégration parmi les organismes et leurs divers emplacements géographiques et ils ne sont pas bien équipés pour pouvoir appuyer les décisions portant sur la gestion des ressources.
2. Certains programmes surveillent les diverses formes de phosphore (dissous, particulaire) et les autres devraient songer à surveiller ces espèces si ce n'est déjà fait. Il existe un besoin manifeste d'augmenter la surveillance en bordure des champs, que ce soit pour les activités de surveillance régulières ou dans le cadre de recherches sur l'efficacité de diverses pratiques de gestion, dont les 4B (4R).

6.2.2 Recommandations portant sur la surveillance

1. Que l'on conçoive et mette en œuvre un réseau de surveillance à long terme optimisé et intégré pour la qualité de l'eau et les pratiques agricoles à l'appui des décisions concernant les meilleures approches à suivre pour réduire les charges en nutriments.
2. Que l'on prévoie des mécanismes de financement stables et des intendants institutionnels pour le suivi et la gestion des données binationales de manière durable et à long terme.

3. Que l'on soutienne la recherche et la surveillance (bassin hydrographique et lac) pour améliorer la compréhension des processus et établir les options de gestion les plus à même de réduire l'exportation de toutes les formes de P afin que, dans la mesure du possible, ce nutriment reste en place et demeure disponible pour que les cultures puissent l'absorber.

6.3 Constatations sur la modélisation

1. Des modèles de qualité de l'eau ont été développés pour une grande partie de la zone d'étude à divers degrés de résolution. Il existe de nombreux programmes de modélisation numérique (logiciel) qui simulent raisonnablement bien les processus agricoles et lacustres. Les ressources informatiques et la vitesse sont généralement suffisantes pour l'exécution des programmes à des fins de recherche.
2. Les modèles, principalement SWAT, fournissent des indications précieuses sur l'efficacité de diverses stratégies de gestion des terres et des éléments nutritifs pour réduire les charges de phosphore. Les résultats suggèrent qu'une large gamme de stratégies sera nécessaire pour atteindre les objectifs de réduction, et que l'on risque de perdre une bonne partie des avantages tirés dans un climat modéré si les précipitations et le ruissellement augmentent à l'avenir. À titre de mise en garde, l'étendue de la mise en œuvre existante n'est pas toujours incluse dans les scénarios de référence du modèle, et la faisabilité de la mise en œuvre supplémentaire est donc incertaine.

6.3.1 Données manquantes et recherches nécessaires en matière de modélisation

1. Les modèles numériques sont handicapés par les lacunes dans la caractérisation des bassins versants, la surveillance des données et la compréhension des processus. Les besoins du processus comprennent l'actualisation des routines P du sol à partir d'une compréhension plus actuelle de la disponibilité et du transport du phosphore, une caractérisation plus fine des sols, une meilleure caractérisation des processus de transformation du champ avant et après l'épandage d'engrais, et divers aspects liés à la composition chimique du fumier, ainsi que les options de gestion et transport ultérieurs du phosphore. Les données disponibles limitent l'efficacité du modèle en ce qui a trait à éclairer de nombreuses décisions de gestion aux échelles nécessaires. Les modèles peuvent être

utilisés pour optimiser les programmes de surveillance et les expériences sur le terrain dans un cycle itératif, mais cela ne se fait pas régulièrement.

2. Il faut des données beaucoup plus disponibles sur la mise en œuvre des pratiques de gestion (p. ex., les 4B ou 4R) pour pouvoir recréer des scénarios exacts dans SWAT et d'autres modèles.

6.3.2 Recommandations portant sur la modélisation

1. Que l'on élabore des modèles opérationnels liés à des réseaux de surveillance optimisés et des enquêtes à haute résolution sur les pratiques agricoles changeantes et les caractéristiques des bassins hydrographiques pour mieux pouvoir prévoir les conditions changeantes et éclairer les décisions de gestion adaptative interannuelles et intrasaisonnières.
2. Que l'on poursuive le soutien financier et politique pour l'élaboration et l'application de modèles de recherche à différentes échelles afin d'améliorer la compréhension des phénomènes et des dynamiques (y compris l'amélioration des tests habituellement menés pour déterminer la teneur en phosphore et d'autres procédés susmentionnés) tout en simulant d'autres scénarios de gestion.

6.4. Des efforts intégrés pour protéger et rétablir le lac Érié

1. Les organismes devraient travailler avec d'autres partenaires (secteur agricole, universitaires et organisations non gouvernementales) pour élargir la recherche visant à améliorer la compréhension des processus fondamentaux des nutriments dans le bassin hydrographique, comprendre l'impact global de multiples projets de conservation sur le terrain et à plus grande échelle au lac Érié, et cerner et appuyer des mesures de gestion supplémentaires jugées nécessaires pour atténuer les répercussions attribuables aux éléments nutritifs dans le lac.

7. Sources citées

Akkari, C., Bryant, C.R. 2017. Toward improved adoption of best management practices (BMP) in the Lake Erie Basin: Perspective from resilience and agricultural innovation literature. *Agriculture* 7(54).

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., van Griensvan, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE* 55(4), 1491-1508.

Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO), 2017. Commercial Fertilizer, disponible sur le site http://www.aapfco.org/publications.html#cf.

Baker, D. B., Confesor, R., Ewing, D. E., Johnson, L. T., Kramer, J. W., Merryfield, B. J. 2014. Phosphorus loading to Lake Erie from the Maumee, Sandusky and Cuyahoga rivers: The importance of bioavailability. *J. Great Lakes Res., 40*(3), 502-517. doi:10.1016/j.jglr.2014.05.001

Bast, L., Mullen, R., O'Halloran, I., Warncke, D., Bruulsema, T. 2009. Phosphorus balance trends on agricultural soils of the Lake Erie drainage basin. *Better Crops*, 93(1), 6-8.

Bertani, I., Obenour, D. R., Steger, C. E., Stow, C. A., Gronewold, A. D., Scavia, D. 2016. Probabilistically assessing the role of nutrient loading in harmful algal bloom formation in western Lake Erie. *J. Great Lakes Res.*, 42(6), 1184-1192.

Betanzo, E.A., Choquette, A.F., Reckhow, K.H., Hayes, L., Hagen, E.R., Argue, D.M. et A.A. Cangelosi, 2015. Water data to answer urgent water policy questions: Monitoring design, available data and filling data gaps for determining the effectiveness of agricultural management practices for reducing tributary nutrient loads to Lake Erie. Rapport du Northeast-Midwest Institute. 169pp. Consulté sur le site http://www.nemw.org/reports/water-quality/ le 17 août 2017.

Boles, C.M.W., Frankenberger, J.R., Moriasi, D.N. 2015. Tile drainage simulation in SWAT2012: Parameterization and evaluation in an Indiana watershed. *Trans. ASABE* 58 (5), 1201–13.

Bosch, N. S., Allan, J. D., Selegean, J. P., Scavia, D. 2013. Scenario-testing of agricultural best management practices in Lake Erie watersheds. *J. Great Lakes Res.* 39(3), 429-436.

Bruulsema, T. 2009. Recommendation Development under 4R Nutrient Stewardship. In *Proceedings North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference*. Vol. 25. Des Moines, IA. Disponible sur le site http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/849509D17481DDDB85257A8C00574254/$FILE/Recommandation%20Development%20under%204R%20Nutrient%20Stewardship.pdf

Bruulsema T.W. 2016. Soil phosphorus trends in the Lake Erie region. *Better Crops* 100, 4-6.

Bruulsema, T. W., Mullen, R. W., O'Halloran, I. P., Warncke, D. D. 2011. Agricultural phosphorus balance trends in Ontario, Michigan and Ohio. *Can. J. Soil Sci.* 91(3), 437-442.

Chaffin, J.D., Bridgeman, T.B., Heckathorn, S.A.,Mishra, S. 2011. Assessment of Microcystis growth rate potential and nutrient status across a trophic gradient in Western Lake Erie. *J. Great Lakes Res.* 37 (1), 92–100. doi :10.1016/j.jglr.2010.11.016.

Christianson, L. E., Harmel, R. D., Smith, D., Williams, M. R., King, K. 2016. Assessment and synthesis of 50 years of published drainage phosphorus losses. *J. Environ. Qual.* 45 (5), 1467–77. doi:10.2134/jeq2015.12.0593.

Christianson, L. E., Harmel, R. D. 2015. 4R Water quality impacts: An assessment and synthesis of forty years of drainage nitrogen losses. *J. Environ. Qual.* 44(6), 1852-1860.

City of Detroit Water and Sewerage Department, 2014. Biosolids Dryer Facility Project Plan, mai 2014.

Commission mixte internationale (CMI). 2014. *Un régime santé pour le lac Érié : Réduction des charges de phosphore et des proliférations d'algues toxiques.* Rapport de la Priorité écosystème du lac Érié, Washington, D.C., et Ottawa (Ontario), 100 pp.

Commission mixte internationale, 2017a. Conseil de la qualité de l'eau des Grands Lacs. Voir le site http://ijc.org/fr_/wqb/Great_Lakes_Water_Quality_Board.

Commission mixte internationale, 2017b. SPARROW. Disponible sur le site http://ijc.org/fr_/IWI/SPARROW.

Cousino, L.K., Becker, R.H., Zmijewski, K.A., 2015. Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed. *J. Hydrolog: Reg. Studies* 4, 762-775.

Culbertson, A.M., Martin, J.F., Aloysius, N. Ludsin, S.A., 2016. Anticipated impacts of climate change on 21st century Maumee River discharge and nutrient loads. *J. Great Lakes Res.* 42(6), 1332-1342.

Davis, T.W., Bullerjahn, G.S., Tuttle, T., McKay, R.M. Watson, S.B. 2015. Effects of increasing nitrogen and phosphorus concentrations on phytoplankton community growth and toxicity during Planktothrix blooms in Sandusky Bay, Lake Erie. *Environ. Sci. Technol.* 49(12), 7197-7207.

DePinto, J.V., Young, T.C., McIlroy, L.M., 1986. Impact of phosphorus control measures on water quality of the Great Lakes. *Environ. Sci. Technol.* 20, 752–759.

Dodd, R. J., Sharpley, A. N. 2015. Conservation practice effectiveness and adoption: unintended consequences and implications for sustainable phosphorus management. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 104(3), 373-392.

Dolan, D. McGunagle, K.P. 2005. Lake Erie Total Phosphorus Loading Analysis and Update: 1996-2002. *J. Great Lakes Res.* 31(Suppl. 2), 11-22.

Dolan, D. Chapra, S.C. 2012. Great Lakes total phosphorus revisited: 1. Loading analysis and update (1994-2008). *Journal of Great Lakes Research*, 38, 730-740.

Eghball, B., Wienhold, B.J., Gilley, J.E., Eigenberg, R.A. 2002. Mineralization of manure nutrients, *J. Soil Water Cons.* 57(6), 470-473.

Ford, W., King, K., Williams, M., Williams, J., Fausey, N. 2015. Sensitivity analysis of the agricultural policy/environmental extender (apex) for phosphorus loads in tile-drained landscapes. *J. Environ. Qual.* 44, 1099-1110.

Gooddy, D.C., Lapworth, D.J., Bennett, S.A., Heaton, T.H.E., Williams, P.J., Surridge, B.W.J. 2016. A multi-stable isotope framework to understand eutrophication in aquatic ecosystems. *Water Res.* 88, 623-633.

Gronberg, J.M. Spahr, N.E. 2012. County-level estimates of nitrogen and phosphorus from commercial fertilizer for the conterminous United States, 1987–2006. U.S.

Geological Survey Scientific Investigations Report 2012–5207, 30 p. Disponible sur le site https://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20125207.

Hamilton, S.K., 2012. Biogeochemical time lags may delay responses of streams to ecological restoration. *Freshwater Biol. 57*(s1), 43-57.

Han, H., Allan, J.D. Bosch, N.S. 2012. Historical pattern of phosphorus loading to Lake Erie watersheds. *J. Great Lakes Res.* 38 (2), 289–98. ION :10.1016/j.jglr.2012.03.004.

Heidelberg University, National Center for Water Quality Research, 2017. Disponible sur le site https://ncwqr.org/

Ho, J.C., Michalak, A.M. 2017. Phytoplankton blooms in Lake Erie impacted by both long-term and springtime phosphorus loading. *J. Great Lakes Res. 43*(3), 221-228.

Holman I.P., Howden, N.J.K., Bellamy, P., Willby, N., Whelan, M.J., Rivas-Casado, M., 2010. An assessment of the risk to surface water ecosystems of groundwater P in the UK and Ireland, *Sci. Total. Environ.*, 408, 1847-1857.

International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2012. A Nutrient Use Information System (NuGIS) for the U.S. Norcross, GA. Le 12 janvier 2012. www.ipni.net/nugis

IPNI. 2017. The nutrient stewardship 4r pocket guide. Disponible sur le site http://www.nutrientstewardship.com/4r-pocket-guide/

Jarvie, H. P., Johnson, L. T., Sharpley, A. N., Smith, D. R., Baker, D. B., Bruulsema, T. W., Confesor, R. 2017. Increased soluble phosphorus loads to Lake Erie : Unintended consequences of conservation practices? *J. Environ. Qual.* 46(1), 123-132.

Jarvie, H. P., Sharpley, A. N., Spears, B., Buda, A. R., May, L., Kleinman, P. J. 2013. Water quality remediation faces unprecedented challenges from legacy phosphorus. *Environ. Sci. Technol.* 47(16), 8997-8998.

Kalcic, M. M., Kirchhoff, C., Bosch, N., Muenich, R. L., Murray, M., Griffith Gardner, J., Scavia, D. 2016. Engaging stakeholders to define feasible and desirable agricultural conservation in western Lake Erie watersheds. *Environ. Sci. Technol.* 50(15), 8135-8145.

Kane, D. D., Conroy, J. D., Richards, R. P., Baker, D. B., Culver, D. A. 2014. Re-eutrophication of Lake Erie: Correlations between tributary nutrient loads and phytoplankton biomass. *J. Great Lakes Res.* 40(3), 496-501.

King, K.W., Williams, M.R., Fausey, N.R. 2014a. Contributions of systematic tile drainage to watershed-scale phosphorus transport. *J. Environ. Qual.* 44 (2): 486–94.

King, K.W., Williams, M.R., Macrae, M.L., Fausey, N.R., Frankenberger, J., Smith, D.R., Kleinman, P.J.A., Brown, L.C. 2014b. Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review. *J. Environ. Qual.* 44(2), 467–85.

King, K. W., Williams, M. R., Johnson, L. T., Smith, D. R., LaBarge, G. A., Fausey, N. R. 2017. Phosphorus availability in western Lake Erie basin drainage waters: legacy evidence across spatial scales. *J. Environ. Qual.* 46(2), 466-469.

Kleinman, P. J., Wolf, A. M., Sharpley, A. N., Beegle, D. B., Saporito, L. S. 2005. Survey of water-extractable phosphorus in livestock manures. *Soil Sci. Soc. America J. 69*(3), 701-708.

Kleinman, P. J., Sharpley, A. N., Withers, P. J., Bergström, L., Johnson, L. T., Doody, D. G. 2015. Implementing agricultural phosphorus science and management to combat eutrophication. *Ambio* 44(2), 297-310.

Knights, D., Parks, K. C., Sawyer, A. H., David, C. H., Browning, T. N., Danner, K. M., Wallace, C. D. 2017. Direct groundwater discharge and vulnerability to hidden nutrient loads along the Great Lakes coast of the United States. *J. Hydrology, 554*(Supplement C), 331-341. ION :https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.001

LimnoTech, 2017. Assessment of Fertilizer and Manure Application in the Western Lake Erie Basin. Rapport rédigé pour le Comité de la priorité scientifique du Conseil consultatif scientifique de la Commission mixte internationale, 120 pp. + appendices. . Disponible à même le site http://ijc.org/files/publications/LimnoTech_IJC_Fertilizer.pdf

Long, C.M., Muenich, R.L., Kalcic, M.M., Scavia, D. 2017. Impacts of Concentrated Animal Feeding Operations and manure on nutrient inputs in a watershed. Association

internationale de recherche sur les Grands Lacs (AIRGL), Assemblée annuelle 2017, Détroit (MI), résumés, p. 244.

Maaskant, K. 2015. Water Quality Assessment in the Thames River Watershed : Nutrient Trends. Diapositives présentées à l'occasion de la conférence sur le lac Sainte-Claire : Understanding and Managing Lake St. Clair, Chatham (Ontario), le

21 octobre 2015. Voir le site https://www.scrca.on.ca/wp-content/uploads/2015/11/LSC-Maaskant.pdf.

Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique de l'Ontario (MEACC), 2012. Rapport-mémoire technique : Analyse des nutriments et de certains métaux dans les eaux usées (bassins de décantation) (2007-2011) provenant des activités d'exploitation de serres à Leamington (Ontario) (Texte disponible en anglais seulement).

Muenich, R.L., Kalcic, M., Scavia, D. 2016. Evaluating the impact of legacy P and agricultural conservation practices on nutrient loads from the Maumee River Watershed. *Environ. Sci. Technol.* 50(15), 8146-8154.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.

Obenour, D. R., Gronewold, A. D., Stow, C. A., Scavia, D. 2014. Using a Bayesian hierarchical model to improve Lake Erie cyanobacteria bloom forecasts. *Water Resour. Res.* 50(10), 7847- 7860.

Ohio Department of Agriculture (ODOA), Ohio Department of Natural Resources, Ohio Environmental Protection Agency, Ohio Lake Erie Commission. 2013. *Ohio Lake Erie Phosphorus Task Force II Final Report*, novembre 2013.

Ohio Environmental Protection Agency (OEPA) Division of Surface Water, 2015. Enhanced Tributary Monitoring in the Western Lake Erie Basin. Columbus, Ohio. Disponible sur le site http://epa.ohio.gov/Portals/35/documents/2015_Enhanced_WLEB_Trib_StudyPlan.pdf.

Ohio Sea Grant, 2017. Tracking Harmful Algal Blooms from Source to Impact. Voir le site https://ohioseagrant.osu.edu/news/2016/530zz/habri-series-1.

Ohio State University (OSU) Extension, Ohio Agronomy Guide, 14th Edition, 2005.

Ohio State University (OSU) Extension, Ohio Livestock Manure Management Guide, 2006.

Ohio State University (OSU) Extension, Ohio Agronomy Guide, 15th Edition, 2017.

Pearce, R., 2011. Drainage statistics reveal some interesting facts about Ontario, Drainage Contractor, le 13 novembre 2011.

Pease, L.A., Fausey, N.R., Martin, J.F., Brown, L.C., 2017. Projected climate change effects on subsurface drainage and the performance of controlled drainage in the Western Lake Erie Basin. *J. Soil Water Cons.* 72(3), 240-250.

Powers, S. M., Bruulsema, T. W., Burt, T. P., Chan, N. I., Elser, J. J., Haygarth, P. M., Howden, N. J. K., Jarvie, H. P., Lyu, Y., Peterson, H. M., Sharpley, A. N., Shen, J. B., Worrall, F., Zhang, F. 2016. Long-term accumulation and transport of anthropogenic phosphorus in three river basins. *Nature Geosci.* 9(5), 353-356.

Prater, C., Frost, P. C., Howell, E. T., Watson, S. B., Zastepa, A., King, S. S. E., Vogt, R. J. Xenopoulos, M. A. 2017. Variation in particulate C :N :P stoichiometry across the Lake Erie watershed from tributaries to its outflow. *Limnol. Oceanogr.* ION :10.1002/lno.10628

Prokup, A., Wilson, R. Zubko, C. Heeren, A. Roe, B. 2017. 4R Nutrient Stewardship in the Western Lake Erie Basin. Columbus, OH: The Ohio State University, School of Environment & Natural Resources.

Rehm, G., Schmitt, M. Lamb, J., Randall, G., Busman, L. 2002. Understanding phosphorus fertilizers. University of Minnesota Extension. Voir le site https://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrient-management/phosphorus/understanding-phosphorus-fertilizers/

Réseau canadien de l'eau, 2017. Gestion des nutriments : Connaissances scientifiques à l'intention des décideurs. Disponible sur le site http://www.cwn-rce.ca/assets/resources/pdf/CWN-Nutrient-Management-Research-Insights-for-Decision-Makers-2017/CWN-Gestions-des-nutriments-connaissances-scientifiques-2017-FR-Web.pdf.

Richards, R.P., Baker, D.B., Crumrine, J.P., Stearns, A.M. 2010. Unusually large loads in 2007 from the Maumee and Sandusky Rivers, tributaries to Lake Erie. *J. Soil Water Cons.* 65(6), 450-462.

Richards, P.R., Baker, D.B., Kramer, J.W., Ewing, E.D., Merryfield, B.J. Miller, N.L. 2001. Storm discharge, loads, and average concentrations in Northwest Ohio Rivers, 1975-1995. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37(2), 423-438.

Richards, R.P., Baker, D.B. 1993. Trends in nutrient and suspended sediment concentrations in Lake Erie tributaries, 1975-1990. *J. Great Lakes Res.* 19(2), 200-211.

Rissien A. 2017. Ohio's concentrated animal feeding facilities: A review of statewide manure management and phosphorus applications in the Western Lake Erie Watershed.

Robertson, D.M., Saad, D.A., 2011. Nutrient inputs to the Laurentian Great Lakes by source and watershed estimated using SPARROW watershed models. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. 47*(5), 1011-1033.

Ruddy, B.C., Lorenz, D.L., Mueller, D.K. 2006. County-Level Estimates of Nutrient Inputs to the Land Surface of the Conterminous United States, 1982–2001. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5012

Scavia, D., Allan, J. D., Arend, K. K. Bartell, S., Beletsky, D., Bosch, N. S., Brandt, S. B., Briland, R. D., Daloglu, I., DePinto, J. V., Dolan, D. M., Evans, M. A., Farmer, T. M., Goto, D., Han, H. J., Hook, T. O., Knight, R., Ludsin, S. A., Mason, D., Michalak, A. M., Richards, R. P., Roberts, J. J., Rucinski, D. K., Rutherford, E., Schwab, D. J., Sesterhenn, T. M., Zhang, H. Y., Zhou, Y. T. 2014. Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie: Central basin hypoxia. *J. Great Lakes Res.* **40,** 226-246.

Scavia, D., Kalcic, M., Logsdon Muenich, R., Aloysius, N., Boles, C., Confesor, R., DePinto, J., Gildow, M., Martin, J., Read, J., Redder, T., Robertson, D., Sowa, S., Wang, Y-C., Yen, H. 2016. *Informing Lake Erie Agriculture Nutrient Management via Scenario Evaluation*, Rapport final, avril 2016.

Scavia, D., Kalcic, M., Muenich, R.L., Read, J., Aloysius, N., Bertani, I., Boles, C., Confesor, R., DePinto, J., Gildow, M., Martin, J., Redder, T., Robertson, D., Sowa, S., Wang, Y. C., Yen, H. 2017. Multiple models guide strategies for agricultural nutrient reductions. *Front. Ecol. Environ.* 15, 126-132.

Sharpley A. 2006. Agricultural phosphorus management: Protecting production and water quality, lesson 34. (Livestock and Poultry Environmental Stewardship (LPES) Curriculum).

Sharpley, A. 2016. Managing agricultural phosphorus to minimize water quality impacts. *Scientia Agricola, 73*(1), 1-8. ION :10.1590/0103-9016-2015-0107

Sharpley, A.N., Kleinman, P.J.A., McDowell, R.W., Gitau, M., Bryant, R.B., 2002. Modeling phosphorus transport in agricultural watersheds: Processes and possibilities. *J. Soil Water Cons. 57*(6), 425-439.

Sharpley, A., Jarvie, H. 2012. *Agricultural management, water quality & ecology : Putting practice into policy.* Étude présentée dans le cadre des actes du colloque du National Agricultural Biotechnology Council.

Sharpley, A., Jarvie, H.P., Buda, A., May, L., Spears, B., Kleinman, P. 2013. Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *J. Environ. Qual.* 42 (5), 1308–26.

Shuchman, R., Liou, L., Grimm, A. 2014. Great Lakes Workshop Series on Remote Sensing of Water Quality: Executive Summary and Final Report on 2014 Series. Michigan Technological University. Disponible sur le site http://mtri.org/workshops/nasagreatlakes2014/assets/for_website/NNX14AC90G_2014_Report.pdf.

Smith, D.R., King, K.W., Williams, M.R. 2015a. What is causing the harmful algal blooms in Lake Erie? *J. Soil Water Cons.* 70, 27A-29A.

Smith, D.R., King, K.W., Johnson, L., Francesconi, W., Richards, P., Baker, D., Sharpley, A.N. 2015b. Surface runoff and tile drainage transport of phosphorus in the Midwestern United States. *J. Environ. Qual.* 44, 495-502.

Smith, E. 2016. Ontario Farmers Making Important Progress for Water Quality in Great Lakes. Disponible sur le site http://www.newswire.ca/news-releases/ontario-farmers-making-important-progress-for-water-quality-in-great-lakes-585866371.html.

Stow, C. A., Cha, Y.K., Johnson, L.T., Confesor, R., Richards, R.P. 2015. Long-term and seasonal trend decomposition of Maumee River nutrient inputs to Western Lake Erie. *Environ. Sci. Technol.* 49 (6), 3392–3400.

Stumpf, R. 2014. Remote Sensing of Lake Harmful Algal Blooms, What We've Learned. Présent lors du webinaire du National Ocean Service de la NOAA, le 14 janvier. Disponible sur le site https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/remote_sensing_of_lake_harmful_algal_blooms_what_weve_learned_richard_stumpf_noaa.pdf.

Stumpf, R. P., Wynne, T.T., Baker, D.B., Fahnenstiel, G.L. 2012. Interannual variability of cyanobacterial blooms in Lake Erie. *PLOS ONE* 7 (8): e42444. ION :10.1371/journal.pone.0042444.

Stumpf, R.P., Johnson, L.T., Wynne, T.T., Baker, D.B. 2016. Forecasting annual cyanobacterial bloom biomass to inform management decisions in Lake Erie. *J. Great Lakes Res.* 42(6), 1174-1183.

Tamburini, F., Pfahler, V., von Sperber, C., Frossard, E., Bernasconi, S.M. 2014. Oxygen isotopes for unraveling phosphorus transformations in the soil-plant system : A review. *Soil Sci. Soc.Am. J.* 78, 38-46.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2015. Phosphorus loading targets for Lake Erie. Annex 4 Objectives and Targets Task Team Final Report to the Nutrients Annex Subcommittee, le 11 mai 2015. Disponible sur le site https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/report-recommended-phosphorus-loading-targets-lake-erie-201505.pdf. Consulté le 16 août 2017.

U.S. EPA, 2016. Great Lakes Environmental Database (GLENDA). Collections and Lists. Octobre. Disponible sur le site https://www.epa.gov/great-lakes-legacy-act/great-lakes-environmental-database-glenda.

U.S. Department of Agriculture (USDA) Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2016. Effects of conservation practice adoption on cultivated cropland acres in western lake erie basin, 2003-06 et 2012.

USDA, NRCS, 2017a. Fertilizer Use and Price, Disponible sur le site https://www.ers.usda.gov/data-products/fertilizer-use-and-price.aspx.

USDA, NRCS, 2017b. Conservation practice adoption on cultivated cropland acres: Effects on instream nutrient and sediment dynamics and delivery in Western Lake Erie Basin, 2003-06 and 2012. 77 pp.

Vadas, P. A., Good, L. W., Moore, P. A., Widman, N. 2009. Estimating phosphorus loss in runoff from manure and fertilizer for a phosphorus loss quantification tool. *J. Environ. Qual.* 38 (4), 1645–1653.

Vadas, P., Bolster, C., Good, L. 2013. Critical evaluation of models used to study agricultural phosphorus and water quality. *Soil Use Manage.* 29, 36-44.

Van Bochove, E., G. Thériault et J.-T. Denault (éditeurs). 2009. Indicateur de risque de contamination de l'eau par le phosphore (IRCE_P). Manuel de présentation des algorithmes de l'IRCE_P. Direction générale de la recherche. Agriculture et agroalimentaire Canada. Québec. Contribution No. AAC/AAFC, 99 pp.

Van Bochove, E., Denault, J.T., Leclerc, M.L., Theriault, G., Dechmi, F., Allaire, S.E., Rousseau, A,N., Drury, C.F. 2011. Temporal trends of risk of water contamination by phosphorus from agricultural land in the Great Lakes watersheds of Canada. *Can. J. Soil Sci.* 91, 443-453.

Verma, S., Bhattarai, R., Bosch, N.S., Cooke, R.C., Kalita, P.K., Markus, M. 2015. Climate change impacts on flow, sediment and nutrient export in a Great Lakes watershed using SWAT. *Clean-Soil Air Water* 43**,** 1464-1474.

Vollmer-Sanders, C., Allman, A., Busdeker, D., Moody, L.B., Stanley, W.G. 2016. Building partnerships to scale up conservation: 4R Nutrient Stewardship Certification Program in the Lake Erie Watershed. *J. Great Lakes Res.* 42 (6), 1395–1402.

Wang, Y.T., Zhang, T.Q., Hu, Q.C. Tan, C.S., 2016. Phosphorus source coefficient determination for quantifying phosphorus loss risk of various animal manures. *Geoderma*, 278, 23-31.

Watson, S.B., Miller, C., Arhonditsis, G., Boyer, G.L., Carmichael, W., Charlton, M.N., Confesor, R., Depew, D.C., Hook, T.O., Ludsin, S.A., Matisoff, G., McElmurry, S.P., Murray, M.W., Richards, R.P., Rao, Y.R., Steffen, M.M., Wilhelm, S.W. 2016. The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia. *Harmful Algae* 56, 44-66.

Williams, M. R., King, K. W., Ford, W., Fausey, N.R. 2016. Edge-of-field research to quantify the impacts of agricultural practices on water quality in Ohio. *J. Soil Water Cons.* 71 (1), 9A–12A.

Wilson, R., Burnett, L., Ritter, T., Roe, B., Howard, G. 2013. Farmers, Phosphorus and Water Quality: A Descriptive Report of Beliefs, Attitudes and Practices in the Maumee Watershed of Northwest Ohio. Columbus, OH: The Ohio State University, School of Environment & Natural Resources.

Wright, J., Sands, G. 2001. Planning an Agricultural Subsurface Drainage System. BU-07685-S. Agricultural Drainage Publication Series. St. Paul, MN: University of Minnesota : Extension Service. http://www.extension.umn.edu/agriculture/water/planning-a-subsurface-drainage-system/.

WTOL. 2017. Ohio Moves Forward with Strategy to Combat Lake Erie's Algae. Accessed March 15. Available from http://www.wtol.com/story/34500188/ohio-moves-forward-with-strategy-to-combat-lake-eries-algae.

Zhang, T. Q., Tan, C. S., Wang, Y. T., Ma, B. L., Welacky, T. 2017. Soil phosphorus loss in tile drainage water from long-term conventional-and non-tillage soils of Ontario with and without compost addition. *Sci. Total Environ.* 580, 9-16.