

Revue de littérature, version française abrégée

PRATIQUES AGROÉCOLOGIQUES DURABLES, APPORT DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ET PERSPECTIVES POUR LA RÉHABILITATION DES PLAINES INONDABLES CULTIVÉES



UNIVERSITÉ
LAVAL



McGill



Université du Québec
à Trois-Rivières

Document remis au comité directeur du pôle d'expertise multidisciplinaire en gestion durable du littoral du lac Saint-Pierre le 15 février 2019.

Bourgeois, B., Vaillancourt, M., Vanasse, A. (2019). Pratiques agroécologiques durables, apport de services écosystémiques et perspectives pour la réhabilitation des plaines inondables cultivées (version abrégée). Pôle d'expertise multidisciplinaire pour la gestion durable du littoral du lac Saint-Pierre, Université Laval, Québec.

Photographie de la page de couverture : Julie Ruiz, 2016.

Partenaire financier :



Le gouvernement du Québec a mis en place en 2018 une importante initiative de recherche visant à promouvoir la restauration de l'écosystème du lac Saint-Pierre et de sa zone littorale : la création du pôle d'expertise multidisciplinaire en gestion durable du littoral du lac Saint-Pierre (ci-après nommé « le Pôle »). Pour atteindre cet objectif, le Pôle est responsable de proposer une stratégie d'intervention dans la zone littorale favorisant la mise en place d'une agriculture durable, adaptée et respectueuse de l'écosystème du lac Saint-Pierre et soutenant la restauration des milieux prioritaires. Par des collaborations multidisciplinaires, le Pôle doit :

- Développer des cultures et des pratiques agricoles adaptées au contexte particulier des grands littoraux cultivés du lac Saint-Pierre qui ont des incidences positives sur la qualité de son écosystème;
- Évaluer la performance et les impacts sociaux, économiques, environnementaux et fauniques des activités agricoles et des projets de restauration;
- À partir des résultats des recherches, proposer au gouvernement un mode de gestion agricole favorisant la mise en place d'une agriculture durable dans le littoral du lac Saint-Pierre.

Ce document présente l'information clé de chaque section de la revue de littérature associée et fournit une liste non exhaustive des principales questions de recherche pour la restauration de la zone littorale du lac Saint-Pierre.

TABLE DES MATIÈRES

L'écosystème du lac Saint-Pierre	4
Stratégies de gestion et de restauration des plaines alluviales	4
Effet des pratiques agricoles actuelles.....	5
Cultures de couverture.....	5
Prairies.....	7
Bandes riveraines	8
Études de cas	10
Questions clés pour la recherche	14

L'écosystème du lac Saint-Pierre

- Le lac Saint-Pierre est à la fois un haut lieu de biodiversité (le site est inscrit à la Convention Ramsar et constitue une réserve de biosphère de l'UNESCO) et un territoire propice aux activités agricoles.
- Durant cinq à neuf semaines, à partir d'avril, le niveau d'eau du lac Saint-Pierre s'élève. Lorsque le niveau d'eau atteint une hauteur de 6,8 m à Sorel, environ 28 000 ha de milieux riverains et terrestres autour du lac sont submergés, ce qui se produit tous les deux ans en moyenne.
- Dans la zone littorale de récurrence des inondations 0-2 ans bordant le lac Saint-Pierre, 5 264 ha sont cultivés par 151 entreprises agricoles. Pour 102 d'entre elles, moins de 5 % des superficies totales se situent en zone littorale; pour 40 d'entre elles, 5 à 20 % des superficies totales se situent en zone littorale; et pour neuf de ces entreprises, plus de 20 % des superficies totales se situent en zone littorale.
- Les cultures pérennes et annuelles couvraient respectivement 3 % et 20 % de la zone littorale en 2014, ce qui représente une augmentation de quatre fois la superficie en cultures annuelles et une réduction de 10 fois la superficie en cultures pérennes entre 1964 et 2014.
- L'écosystème du lac Saint-Pierre a subi des dégradations environnementales majeures, mises en évidence par le déclin abrupt des populations de perchaude au cours des dernières décennies.
- La perchaude se reproduit dans les marais peu profonds, les zones arbustives et les prairies humides de la zone littorale qui sont submergés au printemps.
- Pour la fraie, la perchaude sélectionne des zones caractérisées par un couvert végétal incluant des branches d'arbustes immergées, des tapis de végétaux morts ancrés au sol (dans les prairies inondées) ou des tiges érigées de végétaux (la végétation de marais, incluant roseaux, scirpes et rubaniers) situés dans des zones de faible courant où la profondeur de l'eau varie entre 30 cm et un 1 m et où les températures fluctuent entre 7 et 11 °C. La perchaude évite systématiquement pour la fraie les substrats inorganiques fins présentant un faible couvert végétal.
- Les cultures annuelles réduisent la disponibilité d'habitats favorables à la fraie de la perchaude.
- La dégradation de la qualité de l'eau par les sédiments, les engrais et les pesticides a également mené à d'importantes pertes de peuplements de macrophytes immergés et a réduit l'abondance des proies de la perchaude en période d'alevinage.
- La productivité des invertébrés aquatiques est généralement de 10 à 100 fois supérieure dans la zone littorale comparativement au lac, mais cette productivité est de 2,6 à 10,8 fois plus faible dans les parcelles agricoles fauchées ou labourées, comparativement aux prairies naturelles.
- La connectivité réduite entre le lac et la zone littorale, induite par les routes et les barrages, limite le mouvement des poissons et isole génétiquement les populations.
- La restauration d'habitats, le développement de pratiques agricoles durables dans la zone littorale de récurrence des inondations 0-2 ans du lac Saint-Pierre, l'amélioration de la qualité de l'eau et de la connectivité entre le lac et sa zone littorale devraient constituer les principales priorités pour favoriser les populations de perchaude et, plus généralement, l'ensemble de la biodiversité du lac Saint-Pierre.

Stratégies de gestion et de restauration des plaines alluviales

- La principale stratégie employée dans le monde pour restaurer les plaines alluviales cultivées consiste à exclure les cultures annuelles et à les convertir en prairies extensives ou en zones humides, tout en rétablissant les régimes hydrologiques naturels (lorsque des barrages ont été installés pour contrôler les inondations) et en établissant de meilleures pratiques agricoles (concernant par exemple les cultures de couverture, les voies d'eau engazonnées, les bandes riveraines, la gestion des intrants et l'agriculture biologique) limitées généralement aux zones en amont des bassins versants – non soumises à des inondations régulières.
- La possibilité de produire de façon durable des cultures annuelles en plaine alluviale (et, s'il y a lieu, de quelle façon) reste donc à être déterminée.

Effets des pratiques agricoles actuelles

- Les cultures pérennes sont généralement plus favorables à la qualité de l'eau que les cultures annuelles.
- Certaines études ont démontré une plus grande infiltration de l'eau en culture de soya, comparativement à la culture de maïs, mais un ruissellement de surface similaire.
- Les pertes de phosphore sont généralement plus élevées en soya, comparativement au maïs, tandis que les pertes de nitrates sont similaires entre ces deux cultures, malgré des niveaux de fertilisation différents.
- La porosité plus élevée du sol en semis direct, de même qu'une compaction et un encroûtement moindres favorisent généralement l'infiltration de l'eau. Le semis direct réduit significativement le ruissellement de surface, respectivement de 22 % et de 27 % comparativement au travail réduit et au labour conventionnel; en semis direct, il est également plus avantageux de laisser les résidus au sol plutôt que de les enlever.
- Certaines études ont toutefois démontré un effet non significatif (voire un effet négatif) sur les écoulements d'eau du semis direct comparativement au labour conventionnel, ce qui a été attribué à la plus grande humidité et à la rugosité accrue du sol en semis direct ou encore à une fissuration réduite des sols argileux.
- Relativement au labour conventionnel, le semis direct améliore la structure, le taux de matière organique et la capacité de stockage de l'eau des sols. Il favorise les populations de lombrics et le volume d'eau de drainage, mais aussi les pertes de nitrates. Des systèmes de contrôle du drainage seraient préférables dans les parcelles agricoles en semis direct afin de prévenir le lessivage des nitrates. Ces parcelles devraient être associées à d'autres pratiques (comme des cultures de couverture, la réduction des doses de fertilisants et la fertilisation fractionnée) pour augmenter le stockage et la minéralisation de l'azote.
- La réduction du labour ferait évoluer les communautés d'adventices d'une dominance de dicotylédones annuelles à une dominance de graminées annuelles et d'espèces pérennes. Associer le semis direct à une rotation culturale diversifiée permettrait d'éviter les invasions sévères d'adventices.
- La réduction et le fractionnement de la fertilisation permettent de réduire les pertes de nutriments vers les écosystèmes aquatiques. De plus, les conditions météorologiques au moment de la fertilisation et le type de fertilisant appliqué influencent fortement le lessivage des nutriments.
- La dégradation de la qualité de l'eau par les résidus de pesticides est une préoccupation environnementale grandissante.
- La diversification des rotations culturales, le maintien des résidus de cultures au sol, le désherbage mécanique et l'ajustement des densités de semis afin de favoriser la compétition cultures-adventices constituent des pratiques possibles et intéressantes pour favoriser le contrôle des adventices et réduire l'utilisation d'herbicides.
- L'agriculture biologique est une pratique reconnue pour favoriser la biodiversité en milieu agricole. Elle favorise une meilleure qualité de sol que l'agriculture conventionnelle et un lessivage réduit des nutriments.
- Bien qu'adapter les pratiques agricoles actuelles puisse favoriser la restauration de la zone littorale du lac Saint-Pierre, cette simple adaptation semble insuffisante et devrait être associée à d'autres pratiques agroécologiques.

Cultures de couverture

- Les cultures de couverture ont pour objectif de protéger le sol contre l'érosion et les pertes de nutriments par le ruissellement et le lessivage vers les cours d'eau, tout en améliorant la qualité des sols par leurs effets positifs sur l'activité biologique et la matière organique du sol.
- On reconnaît deux principaux systèmes de cultures de couverture :
 - Système intercalaire : les cultures de couverture sont établies lors du semis ou pendant la croissance de la culture principale, puis cultivées simultanément (par exemple, le ray-grass semé sous couvert dans le maïs au stade quatre à huit feuilles);
 - Système en dérobée : les cultures de couverture sont semées directement après la récolte de la culture principale ou durant ses derniers stades de croissance (par exemple, le radis fourrager, semé après la récolte de céréales, ou le seigle d'automne, semé à la volée avant la défoliation du soya).
- En climat nordique, la saison de croissance est courte et la culture de couverture doit être choisie afin d'optimiser la protection du sol ou le prélèvement de nutriments pendant l'automne et avant les conditions hivernales.

- Les cultures de couverture peuvent être classées en trois grands groupes de plantes, soit les graminées, les légumineuses et les brassicacées, qui diffèrent selon leur morphologie, leur tolérance environnementale (comme la tolérance aux inondations ou au gel), leur taux de décomposition et donc leur utilisation potentielle. Les graminées ont un taux de décomposition plus faible que les légumineuses et leurs résidus couvrent donc le sol plus longtemps. Les annuelles d'hiver ou de saison froide conviennent mieux aux systèmes en dérobée, tandis que les espèces pérennes sont davantage adaptées aux systèmes intercalaires.
- Parmi les espèces à croissance rapide et tolérantes au froid présentant un intérêt, le seigle d'automne constitue probablement l'espèce optimale : ses résidus sont persistants, elle accumule efficacement l'azote et contribue à structurer le sol. Par ailleurs, le ray-grass semble plus tolérant aux inondations que les autres espèces, le radis accumule efficacement l'azote et structure le sol, alors que le lin se caractérise par des résidus persistants.
- Contrôle des adventices :
 - Les cultures de couverture contribuent au contrôle des adventices par des mécanismes de compétition directe et par activité allélopathique.
 - L'efficacité du contrôle des adventices par les cultures de couverture dépend principalement de leur production de biomasse, une biomasse élevée favorisant un meilleur contrôle des adventices.
 - Les cultures de couverture graminées (notamment le seigle) et les mélanges d'espèces sont plus efficaces pour réduire les adventices que les légumineuses seules.
- Services écosystémiques liés au sol et à l'eau :
 - La fourniture de services écosystémiques liés au sol et à l'eau par les cultures de couverture dépend largement de l'espèce, de sa production de biomasse, de son taux de décomposition et de sa méthode de destruction.
 - Les espèces ayant une production de biomasse élevée, comme le seigle, favorisent l'interception des ruissellements d'eau, tandis que les espèces ayant des systèmes racinaires denses et profonds, comme les brassicacées, favorisent l'infiltration de l'eau et la rétention de nutriments. Les cultures de couverture constituées de mélanges d'espèces sont donc susceptibles d'optimiser différents services écosystémiques.
 - Les cultures de couverture non légumineuses réduisent le lessivage des nitrates de 53 % en moyenne. Cependant, l'espèce cultivée, la biomasse de ses racines et de ses parties aériennes, tout comme le labour, les précipitations ou le type de sol influencent largement l'amplitude de cet effet.
 - Des conditions climatiques froides peuvent causer un relargage de phosphore par les cultures de couverture. Elles doivent donc être sélectionnées en fonction du contexte agricole et climatique.
 - La décomposition plus lente des graminées favorise une plus grande accumulation du carbone dans les sols relativement aux légumineuses. Les mélanges d'espèces sont aussi généralement plus bénéfiques pour l'accumulation de carbone organique dans les sols que les cultures de couverture monospécifiques, en raison d'une production accrue de biomasse.
 - L'augmentation de l'activité microbienne du sol sous culture de couverture est généralement positivement corrélée à une augmentation du carbone organique du sol, tandis que les variations de biomasse microbienne, de structure des communautés microbiennes, de biomasse fongique et de biomasse des hyphes fongiques affectent plutôt l'agrégation du sol.
- Conservation de la faune :
 - Peu d'études ont documenté l'effet des cultures de couverture sur la faune, à l'exception d'études montrant une abondance accrue d'invertébrés du sol et de lombrics.
- L'écologie des communautés végétales suggère que des cultures de couverture plurispécifiques (à savoir de mélanges d'espèces) seraient plus propices pour optimiser simultanément différents services écosystémiques.
- Établir des cultures de couverture reste toutefois complexe. Cette pratique nécessite une adaptation aux contraintes locales afin d'optimiser au mieux les bénéfices environnementaux. Par-dessus tout, les études ayant démontré un impact positif des cultures de couverture sur la qualité de l'eau et du sol ont principalement été menées dans des zones non régulièrement inondées; il est donc difficile de prévoir la façon dont les inondations pourront moduler les bénéfices environnementaux des cultures de couverture.

Prairies

- En agriculture, les prairies sont souvent utilisées pour les cultures fourragères pérennes (comme le pâturage, le foin ou l'ensilage) avec des apports de fertilisants moindres que pour les cultures annuelles. Elles peuvent également être établies comme bandes prairiales afin de réduire les pertes en sédiments et en nutriments.
- Au Québec, 22 espèces ou groupes d'espèces ont été identifiés comme plantes fourragères. Cette liste inclut 14 graminées et huit légumineuses, ainsi que 20 espèces pérennes et deux annuelles (le ray-grass italien et le millet japonais), qui diffèrent par leurs caractéristiques morphologiques et par leur tolérance environnementale.
- Parmi ces espèces, deux graminées, l'alpiste roseau et la féтуque élevée, sont caractérisées par une très bonne tolérance aux sols saturés d'eau et aux inondations temporaires.
- En ce qui a trait à la survie hivernale, la phléole est souvent considérée comme l'espèce la plus résistante au froid, tandis que la luzerne et le dactyle aggloméré sont les espèces les plus sensibles aux conditions hivernales.
- Les mélanges à base de tréfle rouge et de lotier corniculé sont généralement mieux adaptés aux sols mal drainés que les mélanges à base de luzerne.
- Pour le pâturage, les mélanges à base de graminées (comme le phléole-alpiste roseau ou le dactyle aggloméré-brome érigé), en association avec des légumineuses (le lotier corniculé ou le tréfle blanc), sont recommandés au Québec.
- Les conditions environnementales de la zone littorale du lac Saint-Pierre suggèrent que l'alpiste roseau (qui possède une forte tolérance aux inondations malgré une vitesse d'implantation lente), la phléole (qui montre une forte tolérance au gel), le tréfle rouge ou le lotier corniculé seraient les mieux adaptés à cet environnement. Les mélanges incluant plus de deux espèces semblent également les plus résilients aux variations environnementales et aux perturbations naturelles régulières.
- Il existe des cultivars d'alpiste roseau sélectionnés pour leur faible concentration en alcaloïdes. Chez cette espèce, la concentration en alcaloïdes est un trait hautement héritable et peut varier de moins de 0,01 % du poids sec à plus de 1 % avec une grande variation parmi les génotypes. Toutefois, les conditions environnementales (l'intensité lumineuse, l'humidité du sol ou la disponibilité des nutriments) peuvent également influencer la concentration d'alcaloïdes. Cette concentration diminue aussi généralement au cours de la croissance. Relativement aux inondations, des études approfondies pourraient permettre de tester si l'hybridation des cultivars avec les populations naturelles, les conditions environnementales ou d'autres molécules que les alcaloïdes affectent l'appétence de l'alpiste roseau cultivé pour son fourrage.
- Services écosystémiques liés au sol et à l'eau :
 - À l'est des États-Unis, la proportion de précipitations résultant en ruissellement diminue de 38 % et les pertes de sol de 92 % en culture de pâturage comparativement aux cultures annuelles labourées conventionnellement.
 - Les rotations de cultures pérennes et annuelles, tout comme les bandes prairiales, réduisent les ruissellements d'eau et favorisent l'infiltration. Cette pratique peut ainsi piéger de grandes quantités de sédiments, d'azote, de phosphore et de résidus de pesticides. Plusieurs facteurs influencent toutefois la rétention de sédiments et de nutriments par les prairies :
 - 1) Les traits racinaires et aériens des espèces prairiales.
 - 2) La structure, la composition, la biomasse et le recouvrement des communautés prairiales.
 - 3) La largeur de la bande prairiale, sa surface et sa localisation dans le bassin versant;
 - La largeur optimale des bandes prairiales pour la rétention de sédiments est évaluée à 10 m.
 - Le ratio de surface de la bande prairiale (le ratio de la surface de drainage sur la surface de bande prairiale) est un facteur clé pour l'efficacité de stockage des sédiments. Alors que plusieurs études se sont basées sur un ratio inférieur à 5:1, les lignes directrices recommandent généralement un ratio de surface de 30:1, avec un maximum de 50:1 à 70:1, selon le type de sol et les précipitations. Pour le contrôle de l'érosion, des approches par modélisation ont déterminé que des bandes prairiales couvrant 10 à 50 % de la surface de drainage peuvent réduire de 55 à 90 % les pertes de nitrates (les

années de précipitations moyennes). Alors que les pertes en nitrates diminuent lorsque la surface des bandes prairiales augmente, cette diminution est plus prononcée entre 10 et 20 % de surface de bandes prairiales qu'entre 20 et 50 %, ce qui suggère qu'une surface de 20 % de bandes prairiales est optimale pour réduire les pertes de nitrates.

- Les bandes prairiales situées en bas de pente sont plus aptes à retenir les sédiments et les nutriments que les bandes prairiales situées à mi-pente.
 - La réduction des pertes en phosphore par les bandes prairiales s'effectue principalement par une diminution des volumes de ruissellement plutôt que par une réduction des concentrations en phosphore dans l'eau de ruissellement.
 - La diversité et la composition végétale des bandes prairiales sont des éléments clés pour la réduction des pertes de résidus d'herbicides solubles. Les bandes prairiales peuvent également filtrer efficacement les pertes d'insecticides (tels que les néonicotinoïdes).
- 4) Fourrage ou pâturage? Une intensité élevée de pâturage peut augmenter les ruissellements tandis que la récolte de biomasse végétale peut limiter le contrôle de l'érosion. La récolte régulière de biomasse peut cependant éviter les risques de saturation des prairies en sédiments et en phosphore (et donc maintenir à long terme leur rôle de filtres).
 - 5) La gestion du sol.
 - 6) Les facteurs naturels (type de sol, hydrologie et, surtout, pente).
- Le contenu en matière organique du sol et l'activité microbienne sont positivement influencés par la culture de prairies, ce qui induit potentiellement des bénéfices indirects sur le contrôle de l'érosion, sur la rétention des nutriments et sur les rendements de cultures annuelles.
- Contrôle des adventices et conservation de la faune :
 - Les cultures fourragères pérennes contribuent au contrôle des adventices grâce à leur couvert dense, à leur fauche régulière et à l'absence de labour, conditions défavorables aux adventices annuelles notamment. La diversification des rotations culturales permet d'alterner fourrages et cultures annuelles. Elle est donc susceptible de promouvoir une réduction de l'utilisation d'herbicides.
 - Les cultures pérennes et les bandes prairiales abritent généralement une plus grande richesse et une plus grande abondance d'arthropodes, de pollinisateurs, de papillons et d'oiseaux champêtres que les cultures annuelles.
 - Bien que certaines études aient démontré une plus grande richesse et abondance des communautés de phytoplancton, de zooplancton ou de macro-invertébrés dans des parcelles restaurées en prairies humides après un usage agricole, de tels résultats doivent être validés dans un contexte de conversion de cultures annuelles en cultures pérennes.

Bandes riveraines

- Les milieux riverains correspondent aux zones d'interface situées entre un écosystème aquatique et un écosystème terrestre, tandis que les bandes riveraines réfèrent plus particulièrement à des milieux riverains situés entre un cours d'eau et une parcelle cultivée. Les bandes riveraines ont été aménagées afin de fournir différents services écosystémiques liés à la qualité de l'eau, à la stabilisation des sols ou à la biodiversité.
- Dans un contexte de restauration de bandes riveraines en zones agricoles, trois types de végétation principaux sont généralement identifiés, en fonction des types biologiques dominant la communauté végétale : les forêts riveraines dominées par des arbres, les végétations riveraines arbustives dominées par des arbustes et les prairies riveraines dominées par des graminées et des dicotylédones herbacées; les communautés plurispécifiques semblables à la végétation forestière sont souvent les plus bénéfiques en matière de services écosystémiques.

- Le United State Department of Agriculture (USDA) recommande l'établissement de bandes riveraines plurispécifiques de 15 à 20 m de large et constituées de trois zones de végétation successives, du champ au cours d'eau : panic érigé, arbustes et arbres.
- La rétention de sédiments par les bandes riveraines peut varier de 21 à 97 % pour une bande de 3 à 65 m de largeur, quel que soit le type de végétation. Cette efficacité est influencée par la largeur de la bande riveraine (optimale entre 10 et 30 m), la pente (optimale à 10 %) et les patrons d'écoulement de l'eau, puisque les ruissellements concentrés limitent l'efficacité de la bande riveraine. Les herbacées piègent efficacement les sédiments : elles réduisent leur perte jusqu'à 95 % en quelques mètres.
- Les bandes riveraines peuvent retenir une partie de l'azote provenant des ruissellements de surface et hypodermiques soit par piégeage physique de l'azote organique, soit par dénitrification de l'azote soluble en conditions anoxiques. L'efficacité de la rétention de l'azote est affectée par l'hydrologie souterraine (un flux plus lent étant plus favorable), par le type de végétation (les arbres et les arbustes sont habituellement plus bénéfiques) et par l'ordre du cours d'eau (les ruisseaux de bas ordre – à savoir de tête de bassin versant – sont plus propices à la dénitrification).
- Bien qu'elle soit un important service écosystémique, la dénitrification qui s'effectue en bande riveraine peut produire une source d'oxyde nitreux (N₂O), ce qui constitue un « dis-service écosystémique » devant être pris en compte. Hormis sur des sols très acides, ce désavantage de production d'oxyde nitreux peut toutefois être largement compensé par les bénéfices liés à la rétention de l'azote.
- La rétention du phosphore par les bandes riveraines, sous forme soluble ou particulaire, est généralement très élevée, mais variable (de -36 % à +89 % d'efficacité en climat froid). L'efficacité de la rétention en phosphore dépend de sa forme (s'il est dissous ou particulaire) et est affectée par deux facteurs : le type de végétation (les arbres sont généralement plus efficaces pour capter ces deux formes) et la gestion de la bande riveraine (la récolte de biomasse végétale favorise à long terme l'efficacité de rétention du phosphore). Les sols riverains n'ont généralement pas tendance à se saturer en phosphore, mais ils se caractérisent par de fortes concentrations en phosphore soluble, ce qui les rend susceptibles au lessivage.
- La rétention de pesticides par les bandes riveraines s'élève à 93 % pour une bande de 30 m de large et dépend des propriétés physicochimiques du pesticide : plus il est adsorbé par le carbone organique du sol, plus il est susceptible d'être capté avec les sédiments. Cette efficacité peut également être diminuée par les ruissellements concentrés ou par les voies de contournement souterraines (par exemple les drains) dans le cas de contaminants solubles.
- Les bandes riveraines réduisent de 61 à 94 % les quantités de pathogènes présents dans les ruissellements d'eau pour des largeurs comprises entre 1,5 et 6 m.
- Les bandes riveraines contribuent à la régulation de la température de l'eau des cours d'eau, notamment durant les jours d'été les plus chauds, grâce à leur ombrage et aux modifications induites sur la géomorphologie du cours d'eau. Cette régulation de la température dépend du type de végétation (les arbres procurent davantage d'ombrage que les herbacées pour des ruisseaux de plus de 2,5 m de large), de la longueur et de la largeur de la bande riveraine (corrélations positives), de même que de l'hydrogéomorphologie du ruisseau (un faible ratio largeur-longueur et une proportion plus élevée de sable dans le substrat sont associés à des températures plus fraîches).
- Les bandes riveraines améliorent la stabilité des sols grâce à leur couvert et à la présence de racines, qui améliorent sa cohésion. La stabilité des sols riverains dépend du type de végétation, les arbres et arbustes étant plus bénéfiques. Les arbres sont toutefois souvent associés à des cours d'eau de plus grande largeur comparativement aux arbustes et herbacées. Un changement dans la structure de la végétation riveraine à la suite d'opérations de restauration peut donc augmenter l'érosion à court terme.
- Les bandes riveraines favorisent la biodiversité en agissant comme habitats, refuges ou sources de nourriture pour la faune (incluant les macro-invertébrés, les oiseaux et les poissons), en augmentant la diversité des habitats aquatiques et semi-terrestres et en agissant comme corridors écologiques. La magnitude de l'effet des bandes riveraines sur la biodiversité est généralement corrélée à leur largeur et à leur longueur (plus leur surface est

grande, plus elles sont bénéfiques) et dépend aussi du type de bassin versant (l'impact local des bandes riveraines sur la biodiversité peut être limité par les pressions environnementales agissant à plus large échelle).

- La réponse de la biodiversité à la présence de bandes riveraines est différente et complémentaire selon qu'elles sont arborées ou herbacées : ces deux types de bandes riveraines abritent des assemblages différents de macro-invertébrés et servent de refuges à différentes espèces de poissons. Il est donc recommandé d'alterner l'établissement de bandes riveraines arborées et herbacées afin de maximiser l'hétérogénéité des habitats et la biodiversité.
- Les facteurs ayant le plus d'impact sur les bénéfices environnementaux des bandes riveraines sont le type de végétation, sa largeur, son étendue et la présence de voies de contournement (comme des drains ou des ruissellements concentrés).
- De nombreuses études ont démontré les multiples bénéfices environnementaux des bandes riveraines sur la qualité de l'eau. Il est toutefois difficile de prévoir comment les inondations moduleront ces bénéfices, considérant notamment que de faibles pentes et des conditions submergées pourraient limiter l'efficacité des bandes riveraines.

Études de cas

- Les politiques agricoles relatives à la qualité de l'eau dans les pays de l'OCDE :
 - En 2004, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a recensé dans ses pays membres 364 moyens d'action permettant de réduire les pollutions diffuses, dont 57 % sont dédiés aux nutriments, 34 % aux pesticides et 8 % à ces deux contaminants.
 - Le nombre d'actions posées pour améliorer la qualité de l'eau varie largement entre les pays membres de l'OCDE : 15 en France, 14 aux États-Unis, 9 au Canada et seulement 2 au Japon.
 - Les principales catégories de mesures visant à limiter les problèmes de qualité de l'eau dus à l'agriculture comprennent les instruments économiques (la *stimulation*, souvent volontaire), les règlements environnementaux (la *régulation*) et les campagnes d'information et de sensibilisation (la *persuasion*), qui peuvent être appliqués à différentes échelles (bassin versant, région ou pays).
 - Les incitatifs agroenvironnementaux (comme les remboursements de taxes, l'aide à l'investissement ou, plus rarement, les rétributions directes) sont largement utilisés dans les pays membres de l'OCDE pour favoriser la préservation de la biodiversité, la réduction des risques de pollution, la conservation des sols, l'établissement de zones tampons ou la restauration de milieux humides, ce qui contribue directement ou indirectement à l'amélioration de la qualité de l'eau.
 - De nouvelles stratégies d'action, telles que les systèmes d'échanges de crédits compensatoires pour la qualité de l'eau (équivalents aux crédits compensatoires du système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre), sont de plus en plus largement mises en place.
 - L'OCDE recommande d'employer des mesures diversifiées pour obtenir une meilleure qualité de l'eau.
- Le programme d'action pour les nitrates (Bretagne, France) :
 - La directive « Nitrates » de l'Union européenne (UE) a été mise en place en 1991 pour réduire la pollution de l'eau par les nitrates de source agricole.
 - Afin de limiter la dégradation progressive de la qualité de l'eau et d'atteindre les objectifs fixés par l'UE, la région de la Bretagne a successivement établi différents programmes d'action.
 - Ces actions comprennent des règles strictes pour l'application de fertilisants, le stockage de fumiers, la mise en place de cultures de couverture et l'établissement de zones tampons le long des rivières.
 - Les cultures de couverture sont obligatoires durant les périodes de jachère longues (mi-septembre à janvier) et courtes, entre la récolte du colza et le semis de la céréale d'hiver suivante (de juillet à octobre) et après la récolte du maïs (de novembre à janvier). Une liste des cultures de couverture autorisées est fournie par les autorités locales et l'usage de fertilisants et de pesticides y est strictement interdit.

- Le long des rivières, une bande de végétation pérenne de 5 m de large doit être implantée (10 m dans les zones d'action renforcée), à l'intérieur de laquelle le pâturage est permis, mais l'application de fertilisants interdite.

- Le réseau Natura 2000 (Europe) :
 - Natura 2000 est un réseau européen de sites naturels protégés établi en 1992 en application des directives « Habitats » et « Oiseaux » afin de préserver les habitats menacés, rares ou essentiels au cycle de vie d'espèces rares et menacées.
 - Natura 2000 liste 58 types d'habitats dont le maintien dépend de pratiques agricoles extensives comme, par exemple, les prairies et pâturages alpins, les prairies humides, les plaines steppiques et les étendues de landes.
 - L'UE fournit des incitatifs financiers et des lignes directrices pour la gestion des habitats agricoles désignés par Natura 2000, incluant des recommandations de période ou de fréquence de fauche, d'intensité de pâturage ou de régulation hydrologique.

- Le programme de réserve de conservation (États-Unis) :
 - Le programme de réserve de conservation (CRP) est un programme d'incitation financière du USDA créé en 1985 par la politique du Farm Bill. L'objectif de ce programme est de promouvoir l'établissement d'un couvert végétal permanent sur des terres cultivées afin de réduire l'érosion des sols, d'améliorer la qualité de l'eau et de conserver la faune.
 - Les lignes directrices précises de gestion des habitats, les conditions d'éligibilité des producteurs et les incitatifs financiers sont établis par l'USDA pour chacune des 16 pratiques de conservation du programme.
 - Les terres arables sont éligibles aux pratiques de conservation si elles ont été cultivées durant quatre des six années précédant l'établissement de la pratique.
 - Les pratiques de conservation comprennent notamment l'établissement d'une végétation permanente composée de graminées ou de légumineuses, introduites ou indigènes, sur des terres cultivées, la mise en place de voies d'eau engazonnées et l'aménagement de bandes prairiales à mi-pente ou de bandes riveraines.

- Le programme de la baie de Chesapeake (Maryland et Virginie, États-Unis) :
 - Le dernier programme de restauration de la baie de Chesapeake, établi en 2014, identifie six actions principales proposées aux producteurs. Ces mesures visent à réduire les pertes de sédiments et de nutriments vers la baie et à atteindre les objectifs des « Charges quotidiennes maximales totales de la baie de Chesapeake » fixés par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA). Il s'agit 1) de mettre en place des pratiques de conservation des sols (le semis direct ou le travail réduit); 2) d'établir des cultures de couverture; 3) d'établir des zones forestières tampons en bordure de parcelles ou le long des rivières; 4) de clôturer les bords des cours d'eau pour en exclure le bétail; 5) de planifier la gestion des fertilisants pour ajuster les doses et synchroniser les moments d'application avec les besoins des cultures; et 6) de favoriser l'installation de systèmes de stockage du lisier, du fumier et des effluents d'élevage.
 - Parmi les 25 pratiques agroenvironnementales dédiées à l'agriculture figurent :
 - La conversion des parcelles d'agriculture intensive en cultures nécessitant une régie moins intensive (de foin ou de pâturage), en particulier sur les terres sujettes à l'érosion.
 - Les cultures de couverture – les céréales d'hiver, d'été et autres cultures de couverture (radis fourrager, légumineuses annuelles, graminées, ray-grass annuel et brassicacées).
 - Les pratiques de gestion des pâturages par des rotations améliorées ou la réduction des charges de bétail.
 - La restauration des cours d'eau par retrait des sédiments ou par recalibrage.
 - Les zones tampons arborées, prairiales, etc.

- Le programme du bassin versant du lac Champlain (Vermont et New York, États-Unis, et Québec, Canada) :
 - Le programme du bassin versant du lac Champlain vise à rétablir l'intégrité de l'écosystème du lac Champlain, notamment en réduisant les pertes de phosphore, qui provoquent des blooms d'algues (objectif prioritaire), en limitant les pertes de contaminants toxiques, en minimisant les risques sanitaires

- pour les populations humaines, et en contrôlant l'introduction, la dissémination et l'impact des espèces invasives.
- En zones agricoles, huit actions de conservation principales sont définies. Elles incluent notamment l'établissement de meilleures pratiques agricoles, la stabilisation des berges et la restauration des bandes riveraines, la réduction de la fertilisation, la conversion des cultures annuelles en cultures pérennes dans 30 % des zones régulièrement inondées, la création de systèmes de captage du phosphore dans les drains et les fossés agricoles ou l'assistance technique pour les producteurs.
- Le programme de restauration du saumon de l'Atlantique du lac Ontario (Ontario, Canada) :
 - Le ministère des Ressources naturelles et de la Foresterie de l'Ontario, en collaboration avec plus de 30 partenaires et promoteurs, a lancé en 2006 un programme de restauration d'une durée de 20 ans afin de rétablir les populations sauvages du saumon de l'Atlantique dans le lac Ontario.
 - Ce programme de restauration inclut quatre composantes principales : le renforcement des populations par lâchers de saumon, l'amélioration de la qualité de l'eau et des habitats, l'information et l'éducation des citoyens et des programmes de recherche et de suivi des actions.
 - L'amélioration de la qualité de l'eau et des habitats se base sur six actions de conservation : 1) la plantation d'arbres dans les bandes riveraines afin de stabiliser les berges et de diminuer la sédimentation et la température de l'eau; 2) la gestion des embâcles pour améliorer et restaurer les débits naturels, nettoyer le substrat et améliorer l'habitat pour les poissons adultes et juvéniles; 3) la stabilisation des berges pour réduire l'érosion et la sédimentation dans les zones de fraie et d'alevinage; 4) la protection des zones humides pour promouvoir la qualité de l'eau; 5) l'installation de clôtures et d'abreuvoirs pour le bétail pour prévenir le pâturage et l'érosion dans la bande riveraine, causes de la destruction des habitats aquatiques; 6) la création de passes à poissons et la destruction de barrages pour rétablir la connectivité écologique des milieux aquatiques et permettre le mouvement des poissons.
 - L'expérience STRIPS (Iowa, États-Unis) :
 - L'expérience Science-based Trials for Rowcrops Integrated with Prairie Strips (STRIPS) a été établie en 2007 aux États-Unis afin d'identifier les effets de la mise en place de bandes prairiales dans des bassins versants cultivés en maïs-soya sur la qualité de l'eau et sur la biodiversité.
 - Dans ce contexte, 12 bassins versants expérimentaux (de 0,4 à 3,2 ha avec des pentes de 6 à 10 %) cultivés en maïs-soya ont été étudiés. Les traitements expérimentaux consistaient en des bandes prairiales placées stratégiquement et présentant les caractéristiques suivantes : 1) 100 % de cultures annuelles (contrôle), 2) 90 % de cultures annuelles et 10 % de bandes prairiales en bas de pente, 3) 90 % de cultures annuelles et 10 % de bandes prairiales à mi-pente (le long des courbes de niveau) et 4) 80 % de cultures annuelles et 20 % de bandes prairiales à mi-pente. Les bandes prairiales avaient une largeur minimale de 4 m, mais étaient plus larges dans les zones d'écoulement préférentielles de l'eau; la distance minimale entre les bandes était de 36 m afin d'accommoder les opérations agricoles.
 - Un modèle économique à l'échelle de la ferme a été utilisé pour déterminer les coûts d'établissement et de gestion des cultures annuelles et des bandes prairiales pour les années 2008-2015.
 - L'intégration de bande prairiales dans les bassins versants expérimentaux a mené à une réduction du ruissellement de 37 % (comparé au traitement sans bandes prairiales), une réduction par 20 fois des pertes en sédiments, une réduction des pertes de phosphore dans les ruissellements de surface de 4,3 fois, une réduction de la concentration totale d'azote dans l'eau de surface de 3,3 fois et dans l'eau souterraine de 3,6 fois.
 - Le traitement incluant 20 % de bandes prairiales a montré une richesse spécifique, une diversité et une abondance d'oiseaux champêtres plus élevées que le traitement incluant 10 % de bandes prairiales. Il a aussi montré des concentrations en carbone organique dissous (COD) plus faibles dans les ruissellements de surface (mais on ne note pas de différence dans les pertes totales de COD).
 - Les rendements des cultures annuelles et le recouvrement d'adventices étaient similaires entre les traitements pour les portions de bassins versants en cultures annuelles. Bien que les pertes de revenus nets (prenant en compte les taxes foncières, les coûts de production, le coût d'établissement des prairies,

les coûts d'entretien et la vente des cultures annuelles) n'aient pas différé significativement entre les traitements, le revenu moyen net à l'échelle du bassin versant était de 124 \$ US ha⁻¹ moins élevé en maïs et de 88 \$ US ha⁻¹ moins élevé en soya pour les traitements incluant des bandes prairiales (du fait d'une moins grande surface en cultures annuelles).

Questions clés pour la recherche

- Relativement à la gestion du paysage :
 - Quelles zones du littoral doivent être priorisées pour la restauration, d'après les dynamiques hydrologiques?
 - Quelles pratiques complémentaires aux cultures pérennes peuvent être durables et sur quelle proportion du paysage peuvent éventuellement être cultivées des cultures annuelles?
 - Quelles caractéristiques du paysage peuvent favoriser ou entraver le succès de la restauration?
 - Comment les pratiques agroécologiques peuvent-elles être mises en place afin de fournir de multiples services écosystémiques?
 - Différentes stratégies de restauration doivent-elles être proposées localement pour promouvoir une diversité d'habitats à l'échelle du paysage?

- Relativement à la provision de services écosystémiques :
 - Quels sont les compromis et les synergies entre les services écosystémiques d'intérêt?
 - Quelles stratégies de restauration peuvent être bénéfiques à différents services?
 - Quels sont les liens entre diversité taxonomique ou fonctionnelle et services écosystémiques?

- Relativement à la gestion des cultures de couverture :
 - Quelles espèces utilisées comme cultures de couverture peuvent survivre et s'établir en condition d'inondation?
 - Est-ce que l'utilisation de cultures de couverture composées d'un mélange d'espèces aux tolérances environnementales et aux traits différents peut optimiser plusieurs services écosystémiques, et ce, pendant les différentes saisons?
 - Quelle pratique agricole adaptée (période de semis, dose de fertilisant, choix de culture principale, méthode de destruction) peut permettre l'utilisation de cultures de couverture sans affecter le rendement des cultures?
 - Quelle est l'influence des cultures de couverture sur la qualité de l'eau (en tenant compte à la fois de la rétention des nutriments et de leur relargage potentiel), sur la physicochimie du sol et sur le contrôle des adventices dans un environnement régulièrement inondé?
 - Quels sont les bénéfices des cultures de couverture pour la biodiversité aquatique et, en particulier, pour la fraie de la perchaude ou pour la productivité du zooplancton?

- Relativement aux cultures pérennes et à la gestion des bandes prairiales :
 - Quelles espèces ou quels mélanges d'espèces peuvent être cultivées en conditions froides et inondées, tout en produisant un fourrage de qualité acceptable?
 - Quelles sont la largeur, la localisation ou la proportion du bassin versant requises pour optimiser les bénéfices des bandes prairiales ou des cultures pérennes par rapport à la qualité de l'eau? Selon quelle gestion agricole les traiter (la récolte de fourrage, le pâturage, l'absence de gestion)?
 - Quels sont les bénéfices directs et indirects des cultures pérennes sur la faune aquatique et/ou terrestre?

- Relativement à la gestion des bandes riveraines :
 - Comment les bénéfices environnementaux des bandes riveraines précédemment identifiés sont-ils modulés par des inondations récurrentes?
 - Quelles espèces et quels modes d'implantation (sous forme de graines, de rhizomes ou de jeunes plants) facilitent l'établissement d'une végétation riveraine malgré des inondations récurrentes?
 - Quels sont les impacts des bandes riveraines sur la biodiversité, en particulier sur la perchaude?

- Comment doivent être restaurées les bandes riveraines pour ne pas entraver la connectivité hydrologique et les mouvements du poisson?
- Relativement à la complémentarité des pratiques :
 - Quels sont les compromis et les synergies entre les différentes pratiques agroécologiques?
 - Différentes pratiques agroécologiques peuvent-elles être proposées pour atteindre un but spécifique?
- Relativement à d'autres pratiques bénéfiques potentielles :
 - Des cultures de rechange (par exemple, le sarrasin, le riz, les plantes médicinales, les petits fruits) plus durables peuvent-elles être cultivées dans la zone littorale?
 - Des actions supplémentaires sont-elles requises dans les zones en amont de la zone littorale et, le cas échéant, lesquelles (des bassins de rétention de sédiments, l'élargissement du lit de rivières, la gestion hydrologique)?
- Relativement aux aspects socioéconomiques :
 - Quels sont les coûts et les bénéfices, directs ou indirects, des pratiques agroécologiques?
 - Quels paramètres favorisent l'adoption de pratiques agroécologiques par les producteurs?
 - Quels instruments financiers ou réglementaires peuvent être mis en place pour favoriser l'adoption de pratiques agroécologiques?
 - Comment favoriser l'adhésion des citoyens au projet de restauration et encourager leur engagement?
- Relativement aux défis méthodologiques :
 - Comment évaluer précisément l'effet des pratiques agroécologiques sur la qualité de l'eau durant la crue alors que les masses d'eau se mélangent? Une approche expérimentale par bassin versant peut-elle être appropriée?
 - Comment mesurer et prendre en compte les variations intersaisonnières dans la fourniture de services écosystémiques (comme la rétention de nutriments par rapport au relargage en lien avec le climat)?
 - La modélisation hydrologique peut-elle permettre de définir la localisation ou la largeur des traitements expérimentaux à tester?
 - Comment transférer les résultats d'expériences locales à l'ensemble de la zone littorale?
- Relativement à la gestion à long terme :
 - Comment varie la fourniture de services écosystémiques dans le temps? Quelles opérations peuvent permettre de les maintenir à long terme?
 - Quelles pratiques agroécologiques peuvent supporter des changements environnementaux à long terme, tels que les changements climatiques, ou encore résister aux invasions biologiques?