



## L'EAU ET L'AGRICULTURE AU CANADA : VERS UNE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAU

Le comité d'experts sur la gestion durable  
de l'eau des terres agricoles du Canada



Council of Canadian Academies  
Conseil des académies canadiennes

*Le savoir au service du public*



## **L'EAU ET L'AGRICULTURE AU CANADA : VERS UNE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAU**

**Le comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles  
du Canada**

## LE CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES

180, rue Elgin, bureau 1401, Ottawa (Ontario) Canada K2P 2K3

**Avis :** Le projet sur lequel porte ce rapport a été entrepris avec l'approbation du conseil des gouverneurs du Conseil des académies canadiennes (CAC). Les membres du conseil des gouverneurs sont issus de la Société royale du Canada (SRC), de l'Académie canadienne du génie (ACG) et de l'Académie canadienne des sciences de la santé (ACSS), ainsi que du grand public. Les membres du comité d'experts responsable du rapport ont été choisis par le CAC en raison de leurs compétences spécifiques et en vue d'obtenir un éventail équilibré de points de vue.

Ce rapport a été préparé pour le gouvernement du Canada en réponse à une demande soumise par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire. Les opinions, constatations et conclusions présentées dans cette publication sont celles des auteurs, à savoir les membres du comité d'experts sur la gestion durable des eaux des terres agricoles du Canada, et ne reflètent pas nécessairement les points de vue des organisations où ils travaillent ou auxquelles ils sont affiliés.

### Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

L'eau et l'agriculture au Canada [ressource électronique] : vers une gestion durable des ressources en eau / Le Comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada.

Publ. aussi en anglais sous le titre: Water and agriculture in Canada.

Comprend des réf. bibliogr. et un index. Monographie électronique en format PDF.

Publ. aussi en format imprimé.

ISBN 978-1-926558-54-7

1. Eau en agriculture—Canada. 2. Eau—Approvisionnement agricole—Politique gouvernementale—Canada. 3. Agriculture durable—Politique gouvernementale—Canada. 4. Politique agricole—Canada. I. Conseil des académies canadiennes. Comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada

S494.5.W3W3714 2013 333.91'3170971 C2013-900249-9

Le rapport peut être cité comme suit :

Conseil des académies canadiennes, 2013. L'eau et l'agriculture au Canada : vers une gestion durable des ressources en eau. Le comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada, Conseil des académies canadiennes.


**Avis de non-responsabilité :** Au meilleur de la connaissance du CAC, les données et les informations tirées d'Internet qui figurent dans le présent rapport étaient exactes à la date de publication du rapport. En raison de la nature dynamique d'Internet, des ressources gratuites et accessibles au public peuvent subséquemment faire l'objet de restrictions ou de frais d'accès, et l'emplacement des éléments d'information peut changer lorsque les menus et les pages Web sont modifiés.

© 2013 Conseil des académies canadiennes

Imprimé à Ottawa, Canada



Council of Canadian Academies  
Conseil des académies canadiennes

Canada  Cette évaluation a été rendue possible grâce à l'appui du gouvernement du Canada.

## **Le Conseil des académies canadiennes**

### *Le savoir au service du public*

Le Conseil des académies canadiennes (CAC) est un organisme indépendant à but non lucratif qui soutient des évaluations scientifiques indépendantes, effectuées par des experts, visant à éclairer l'élaboration de politiques publiques au Canada. Dirigé par un conseil de 12 gouverneurs et conseillé par un comité consultatif scientifique de 14 membres, le CAC a pour champ d'action la « science » au sens large, ce qui englobe les sciences naturelles, les sciences sociales, les sciences de la santé, ainsi que le génie et les sciences humaines.

Les évaluations du CAC sont effectuées par des comités pluridisciplinaires indépendants d'experts provenant du Canada et de l'étranger. Ces évaluations visent à cerner des problèmes émergents, des lacunes dans les connaissances, les atouts du Canada, ainsi que les tendances et les pratiques internationales. Ces études fournissent aux décideurs gouvernementaux, aux universitaires et aux parties prenantes les renseignements de haut calibre dont ils ont besoin pour élaborer des politiques publiques éclairées et novatrices.

Toutes les évaluations du CAC sont soumises à un examen formel. Elles sont publiées en français et en anglais et mises à la disposition du public sans frais. Des fondations, des organisations non gouvernementales, le secteur privé et tout palier de gouvernement peuvent soumettre au CAC des questions susceptibles de faire l'objet d'une évaluation.

Le CAC bénéficie aussi du soutien de ses trois académies membres fondatrices :

**La Société royale du Canada (SRC)** est le principal organisme national regroupant d'éminents scientifiques, chercheurs et artistes au Canada. La SRC a pour objectif premier de promouvoir l'acquisition du savoir et la recherche en arts et en sciences. Elle compte près de 2000 membres, des hommes et des femmes choisis par leurs pairs pour leurs réalisations exceptionnelles en sciences naturelles, en sciences humaines et en arts. La SRC s'attache à reconnaître l'excellence, à conseiller les gouvernements et les organisations et à promouvoir la culture canadienne.

**L'Académie canadienne du génie (ACG)** est l'organisme national par l'entremise duquel les ingénieurs les plus chevronnés et expérimentés du Canada offrent au pays des conseils stratégiques sur des enjeux d'importance capitale. Fondée en 1987, l'ACG est un organisme indépendant, autogéré et à but non lucratif. Les membres de l'ACG sont nommés et élus par leurs pairs à titre honorifique en fonction de leurs réalisations exceptionnelles et de leurs longs états de service

au sein de la profession d'ingénieur. Les membres de l'ACG s'engagent à faire en sorte que l'expertise en génie du Canada soit mise au service du plus grand bien de tous les Canadiens et Canadiennes.

**L'Académie canadienne des sciences de la santé (ACSS)** reconnaît des personnes qui ont à leur actif de grandes réalisations dans le domaine des sciences de la santé en milieu universitaire au Canada. Fondée en 2004, l'ACSS compte environ 400 membres et elle nomme de nouveaux membres à chaque année. L'organisme est géré par un conseil de direction bénévole et un comité exécutif. La principale fonction de l'ACSS est de fournir des évaluations pertinentes, éclairées et impartiales sur des questions urgentes qui touchent la santé des Canadiens et des Canadiennes. De plus, l'ACSS surveille l'évolution des événements touchant à la santé mondiale afin de renforcer la capacité d'intervention du Canada pour l'avenir, et elle sert de porte-parole au Canada dans le domaine des sciences de la santé sur la scène internationale. Enfin, l'ACSS offre une voix collective et multidisciplinaire faisant autorité au nom de la collectivité des sciences de la santé.

[www.sciencepourlepublic.ca](http://www.sciencepourlepublic.ca)

@scienceadvice

## **Le comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada**

**Howard Wheeler (président)**, Titulaire de la Chaire d'excellence en recherche du Canada sur la sécurité de l'eau; professeur, École de l'environnement et du développement durable et Département de génie civil et géologique; Collège d'ingénierie, Université de la Saskatchewan (Saskatoon, SK)

**Elena Bennett**, Professeure adjointe, Département de sciences des ressources naturelles et École d'environnement de McGill, Université McGill (Montréal, QC)

**Rob de Loë**, Chaire de recherche universitaire, Réglementation des eaux et gouvernance, Université de Waterloo (Waterloo, ON)

**Bob Friesen**, Président, Farmers of North America Strategic Agriculture Institute (FNA-STAG) (Ottawa, ON)

**Kirk E. Hamilton**, Économiste principal, Groupe de recherche sur le développement, Banque mondiale (Washington, DC)

**Lorne Hepworth**, Président, CropLife Canada (Ottawa, ON)

**Dave McGee**, Gestionnaire principal en matière de politiques et de mise en œuvre, Alberta Environment (Lethbridge, AB)

**Diane Parent**, Professeure titulaire et chercheure, Département des sciences animales, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval (Québec, QC)

**John Pomeroy**, Chaire de recherche du Canada en ressources d'eau et en changement climatique, Université de la Saskatchewan (Saskatoon, SK)

**David Rudolph**, Professeur, Département des sciences environnementales et de la Terre, Université de Waterloo (Waterloo, ON)

**Stephen R. Smith**, Professeur de systèmes de bioressources, Département de génie civil et de l'environnement, Collège impérial de Londres (Londres, Royaume-Uni)

**Ronald Stewart, MSRC**, Professeur et directeur de département, Département de l'environnement et de la géographie, Université du Manitoba (Winnipeg, MB)

**P. Kim Sturgess, MACG**, Présidente-directrice générale et fondatrice, Alberta WaterSMART (Calgary, AB)

**Barry Thompson**, Gestionnaire et coordinateur, Ressources agricoles durables, ministère de l'Agriculture, gouvernement de l'Île-du-Prince-Édouard (Charlottetown, PE)

**Rene Van Acker**, Professeur, Département de l'agriculture végétale et doyen associé affecté aux relations externes, Collège de l'agriculture de l'Ontario, Université de Guelph (Guelph, ON)

## Remerciements

Le comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada a été créé en réponse à une requête du ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, sollicitant auprès du Conseil des académies canadiennes un avis scientifique pour aider à guider la gestion durable de l'eau dans le secteur agricole au Canada. Au nom du comité d'experts, je voudrais remercier le ministre d'avoir abordé en temps opportun cette importante question.

Le présent rapport traduit les efforts et les contributions de 15 spécialistes de diverses disciplines provenant du Canada et de l'étranger. Je suis extrêmement reconnaissant envers mes collègues du comité, qui n'ont pas ménagé temps et effort pour que ce rapport ait la qualité et la profondeur requises. Le rapport est le fruit des réflexions et du jugement collectifs des membres du comité d'experts et une entreprise de cette envergure aurait été impossible sans leur soutien et leurs avis éclairés.

Je voudrais aussi remercier John Kolk, qui a enrichi nos débats par ses nombreuses observations utiles mais qui a dû quitter le comité avant que le rapport ne soit complété pour se porter candidat à l'élection provinciale de 2012 dans la circonscription de Little Bow, en Alberta.

Je remercie également les membres du personnel du Conseil des académies canadiennes pour leur appui et leur aide tout au long du processus. Leurs efforts assidus ont fait en sorte que notre démarche procède sans heurts, et ils ont contribué à renforcer globalement les travaux du comité. Enfin, je tiens à remercier Elizabeth Dowdeswell, présidente du Conseil des académies canadiennes pour les conseils judicieux et le soutien incessant qu'elle a fournis au comité d'experts tout au long de ses délibérations. Ses efforts ont été grandement appréciés.



**Howard Wheeler, président**

Comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada



## **Personnel responsable du projet au Conseil des académies canadiennes**

Équipe affectée à l'évaluation : Tim Krywulak, directeur de programme  
Marc M. Dufresne, associé de recherche  
Stefan Jungcurt, associé de recherche  
Fiona McArthur, associée de recherche  
Rebecca Chapman, chercheuse  
Wendy Y. Shen, coordonnatrice de programme

Avec la collaboration de : NIVA Inc., services de révision  
Accurate Communications, conception  
du rapport  
CIGC Inc., services de traduction de l'anglais  
au français

## Examen du rapport

Ce rapport a été examiné à l'état d'ébauche par les personnes dont les noms figurent ci-dessous – un groupe d'examineurs choisis par le Conseil des académies canadiennes (CAC) en raison de la diversité de leurs points de vue et de leurs domaines de spécialisation, et de leur représentativité des organisations universitaires, politiques et non gouvernementales.

Les examineurs ont évalué l'objectivité et la qualité du rapport. Leurs observations, qui demeureront confidentielles, ont été pleinement prises en compte par le comité d'experts, et la plupart de leurs suggestions ont été intégrées au rapport. Ces personnes n'ont pas été invitées à approuver les conclusions du rapport et elles n'ont pas vu la version finale avant sa publication. Le comité d'experts sur la gestion durable des eaux des terres agricoles du Canada et le Conseil des académies canadiennes assument l'entière responsabilité du contenu définitif du rapport.

Le CAC tient à remercier les personnes suivantes d'avoir accepté d'examiner le rapport :

**Ken W. Belcher**, Département de politique, de commerce et d'économie des bioressources, École de l'environnement et de la durabilité, Université de la Saskatchewan (Saskatoon, SK)

**Safia Hamoudi**, professeure adjointe, Département des sols et du génie agroalimentaire, Université Laval (Québec, QC)

**Isobel W. Heathcote**, professeure, Université de Guelph, présidente, Wyndham Research Inc. (Bracebridge, ON)

**Calestous Juma**, professeur, Pratique de développement international, Harvard Kennedy School (Cambridge, MA)

**Gary Kachanoski**, président et recteur, Université Memorial de Terre-Neuve (St. John's, NL)

**Kerry T.B. MacQuarrie**, professeur et titulaire d'une chaire de recherche du Canada, Département de génie civil et Institut canadien des rivières, Université du Nouveau-Brunswick (Fredericton, NB)

**Nancy Olewiler**, professeure et directrice, École de politique publique, Université Simon Fraser (Vancouver, CB)

**Alain N. Rousseau**, professeur titulaire et chercheur, INRS-ETE (Québec, QC)

**Robert Sandford**, président, Initiative de partenariat canadien, Décennie internationale d'action de l'ONU – L'eau source de vie (Canmore, AB)

**David Sauchyn**, professeur-chercheur, Prairie Adaptation Research Collaborative, Université de Regina (Regina, SK)

**Gord Surgeoner**, président, Ontario Agri-Food Technologies (Guelph, ON)

**Harry Swain**, associé de recherche principal, Centre d'études mondiales, Université de Victoria (Victoria, CB)

La procédure d'examen du rapport a été supervisée au nom du conseil des gouverneurs et du comité consultatif scientifique du CAC par **Daniel Krewski**, professeur, Département d'épidémiologie et de médecine sociale, et directeur scientifique du Centre Samuel McLaughlin d'évaluation du risque pour la santé des populations, Université d'Ottawa (Ottawa, ON).

Le rôle du superviseur était de s'assurer que le comité d'experts prenne en considération de manière complète et équitable les observations des examinateurs du rapport. Le conseil des gouverneurs du CAC n'autorise la publication du rapport d'un comité d'experts qu'une fois que la personne responsable du contrôle de l'examen du rapport ait confirmé que le rapport satisfait aux exigences du CAC. Le CAC remercie le M. Krewski de la diligence avec laquelle il a supervisé l'examen du rapport.



**Elizabeth Dowdeswell**, O.C., présidente-directrice générale  
Conseil des académies canadiennes

## Sommaire

L'agriculture fait une contribution importante à la prospérité et au bien-être du Canada. La production agricole primaire joue un rôle vital dans le secteur alimentaire, dont l'activité économique est évaluée à près de 100 milliards de dollars annuellement et qui représente environ 1 emploi sur 7,5 au pays. Elle est la principale source de sécurité alimentaire et de soutien pour les collectivités rurales. Pour de nombreux Canadiens, elle constitue non seulement une source de revenu, mais un mode de vie.

Des possibilités importantes s'offriront à l'agriculture canadienne dans les décennies à venir. Sous l'effet de la croissance démographique et d'autres facteurs, la demande mondiale d'aliments devrait plus que doubler d'ici 2050, tandis que la progression des revenus dans le monde fait évoluer les profils de consommation alimentaire vers des formes de production agricole à valeur élevée (mais nécessitant aussi une plus grande quantité d'eau), comme la viande et les produits laitiers et accroît la demande de produits agricoles non alimentaires tels que les biocarburants et les fibres naturelles.

Du même coup, la concurrence accrue pour l'eau, les terres et les autres ressources, ainsi que l'impact incertain du changement climatique et de la variabilité du climat, susciteront des tensions accrues dans le secteur de la production agricole partout dans le monde. Au Canada, parmi les risques et les incertitudes les plus importants, il y a l'impact de l'agriculture sur la quantité et la qualité de l'eau; l'accès du secteur agricole à l'eau, aux terres et aux autres ressources; et la façon dont ce secteur pourra faire face aux défis posés par le changement climatique et d'autres tendances. Il importe de s'attaquer sans délai à ces risques et ces incertitudes si nous voulons que le Canada conserve un secteur agricole dynamique, en mesure de tirer parti des possibilités qui se présentent et de contribuer à satisfaire les besoins alimentaires mondiaux.

Afin de se préparer en vue de saisir ces occasions et de relever ces défis, le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire (le commanditaire) a demandé au Conseil des académies canadiennes (CAC) de réunir un comité d'experts pour examiner la question suivante :

*Quelles études scientifiques supplémentaires sont nécessaires pour mieux encadrer la gestion durable de l'eau, afin de répondre aux besoins de l'industrie agricole?*

Dans le but de répondre à cette question, le CAC a réuni un comité multidisciplinaire formé de spécialistes canadiens et étrangers ayant une expertise en hydrologie, en agriculture, en climatologie, en génie, en économique, en gestion et en gouvernance de l'eau et dans d'autres domaines. Le comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada (le comité) a recueilli et analysé des données pertinentes sur des sujets tels que les ressources hydriques du Canada, l'avenir de l'eau en agriculture et dans d'autres industries, l'agriculture et l'environnement, les pratiques de gestion bénéfiques (PGB) au Canada et dans d'autres pays, les tendances de la technologie et de l'innovation, les cadres de politique publique et les instruments économiques, ainsi que les volets communication et mobilisation des intervenants dans la gestion des terres et de l'eau. Les renseignements recueillis aux fins de cet examen ont été combinés à l'expertise, à l'expérience et au jugement des membres du comité d'experts.

## LES OBSERVATIONS

Après un examen des données disponibles, le comité d'experts a défini cinq domaines clés où des connaissances scientifiques plus poussées et des mesures nécessaires pourraient contribuer à améliorer la gestion durable de l'eau en agriculture. L'aperçu qui suit résume ces cinq domaines, qui correspondent aux cinq chapitres principaux du rapport.

1. *Parvenir à une meilleure compréhension des risques et des incertitudes entourant des questions telles que les conditions du marché, la concurrence pour les terres et les ressources hydriques et le changement climatique afin d'éclairer les décisions de gestion, et d'aboutir à des pratiques de gestion plus efficaces et à de meilleurs résultats (chapitre 2).*

Afin de déterminer quelles connaissances scientifiques supplémentaires sont requises pour assurer une gestion durable de l'eau en agriculture au Canada, il importe de bien comprendre les principaux déterminants mondiaux qui influent sur l'avenir du secteur agricole, ainsi que le contexte économique, environnemental et social dans lequel s'inscrit le secteur agricole canadien. Aux fins du présent rapport, le comité d'experts a examiné les données scientifiques disponibles sur les tendances et les débouchés futurs à l'horizon 2050. Le comité a observé que durant cette période, l'évolution des conditions du marché engendrera vraisemblablement de nouvelles possibilités d'exportation axées vers des formes de production agricole nécessitant de plus grandes quantités d'eau. Cette tendance surviendra dans un contexte où le développement urbain et industriel, le changement climatique et d'autres facteurs exerceront une pression croissante sur les terres, l'eau et les autres

ressources au Canada et ailleurs dans le monde. Qui plus est, l'intensification concomitante de la concurrence pour les ressources pourrait engendrer des pressions sociales obligeant le secteur agricole à démontrer de façon plus convaincante sa contribution à la croissance économique, à la sécurité alimentaire et à la protection de l'environnement, tandis que des risques d'origine réglementaire et non réglementaire pourraient imposer des changements dans les méthodes de production et le choix des lieux de production. Des recherches supplémentaires portant sur ces domaines et d'autres qui laissent entrevoir des possibilités, et sur les risques et les incertitudes connexes, pourraient aider les producteurs agricoles, les responsables des politiques et d'autres intervenants à prendre des décisions plus éclairées au chapitre de la planification de la production, des investissements en infrastructure et des politiques agricoles.

Le comité est d'avis que les domaines prioritaires englobent la recherche sur les changements dans les conditions du marché, les politiques et les perceptions sociales qui pourraient faire surgir de nouveaux risques et des possibilités nouvelles pour l'agriculture; les conséquences d'une concurrence accrue pour les terres, l'eau et les autres ressources; et les répercussions du changement climatique et de la variabilité accrue du climat dans l'ensemble des régions agricoles du Canada. Le comité d'experts a observé que le changement climatique posera probablement des défis accrus pour le secteur agricole partout dans le monde. Dans certaines des plus grandes régions agricoles du monde, on peut s'attendre à une baisse de précipitations. Au Canada, le changement climatique touchera à la fois les conditions de croissance des cultures non irriguées et les ressources en eaux de surface et souterraines qui soutiennent l'irrigation et les activités d'élevage. Globalement, on peut anticiper une fréquence accrue des événements climatiques extrêmes, y compris des inondations et des sécheresses; certains événements récents en Amérique du Nord et ailleurs dans le monde ont permis de voir les conséquences potentielles de cette tendance sur la production alimentaire mondiale. Au Canada, les Prairies ont connu à travers l'histoire une succession d'inondations et de périodes de sécheresse; le comité d'experts a constaté avec une certaine inquiétude que les recherches récentes avec divers scénarios de changement climatique laissent présager un risque accru de sécheresse extrême dans les Prairies. De l'avis du comité, en raison du degré élevé d'incertitude en ce qui concerne les conditions futures, de nouvelles approches seront requises pour appuyer l'élaboration des politiques, la gouvernance et la gestion de l'eau aux fins de la production agricole. En particulier, il faudrait mener des recherches sur le potentiel de gestion adaptative afin d'élaborer des stratégies robustes qui aideront à composer avec l'incertitude au sujet de l'avenir de l'eau, et sur le rôle des études prospectives pour guider ces stratégies.

2. *Améliorer les données de surveillance sur les aspects plus préoccupants en adoptant une approche axée sur le risque, et renforcer la capacité d'interprétation scientifique de ces données, pour favoriser une meilleure compréhension du patrimoine des ressources hydriques du Canada et des changements qui se produisent sur les plans de l'hydrologie, de l'écologie et du climat et pour faciliter une gestion adaptative (chapitre 3).*

L'accès à un approvisionnement fiable et suffisant en eau douce est une condition essentielle pour l'agriculture. La plus grande partie de la production agricole dépend des précipitations naturelles (pluie ou neige), parfois appelée « eau verte ». Pour l'agriculture non irriguée, les préoccupations concernant l'eau sont centrées sur a) les conditions climatiques favorables aux cultures (c.-à-d. un niveau adéquat et fiable de précipitations d'une année à l'autre, les conditions extrêmes où il y a trop ou pas assez d'eau, et le changement climatique); b) une gestion des terres visant à optimiser les conditions hydrologiques pour les cultures (p. ex. en recourant au drainage ou à des méthodes de travail du sol); et c) les répercussions des activités agricoles sur la quantité et la qualité de l'eau des systèmes d'eaux de surface et souterraines.

L'irrigation et les autres formes d'utilisation de l'eau à des fins agricoles (p. ex. pour l'élevage intensif ou la transformation des aliments) puisent dans les sources d'eau de surface (rivières et lacs) ou les nappes d'eau souterraines. C'est ce qu'on appelle parfois « l'eau bleue », et son utilisation entre souvent en concurrence avec d'autres types de demande pour l'eau (p. ex. l'eau potable, les autres utilisations urbaines de l'eau, l'industrie, la production hydroélectrique et le maintien d'écosystèmes en santé). L'irrigation est essentielle à l'agriculture dans les régions où les précipitations sont faibles et/ou variables et elle peut également permettre une plus grande productivité, une diversité accrue (pour les cultures à valeur élevée) et des produits de qualité. Cependant, l'irrigation est la plus grande source de consommation d'eau bleue dans le monde (entre 70 et 80 % de la consommation mondiale d'eau). Les préoccupations au sujet de l'utilisation de l'eau bleue ont trait à la quantité et à la qualité de l'eau disponible, ainsi qu'aux répercussions des activités agricoles sur la qualité des ressources hydriques de surface et souterraines.

Une sérieuse menace à la santé du secteur agricole est le stress hydrique, lié soit à la quantité et à la qualité de l'eau utilisée par l'agriculture, soit à la quantité et à la qualité de l'eau qui s'écoule des terres agricoles. Les causes du stress hydrique dépendent des conditions locales. Ainsi, dans certaines régions des Prairies, l'irrigation est la principale source de consommation d'eau bleue dans des secteurs où les ressources hydriques sont entièrement attribuées, alors que l'approvisionnement de la région en eau verte a été marqué à la fois par d'importantes inondations (comme en 2011) et par des sécheresses (comme en 2001-2002). Dans certaines régions de la Colombie-Britannique, l'utilisation de l'eau à des fins agricoles fait face à une vive concurrence de la part d'autres utilisateurs et de l'environnement. Ainsi, dans la vallée de l'Okanagan, une région où l'activité agricole dépend de l'irrigation, il y a eu une forte croissance démographique ces dernières années, et le niveau d'approvisionnement disponible en eau a déjà, ou presque déjà, été atteint. La contamination des eaux de surface et des nappes souterraines imputable au ruissellement agricole est une préoccupation majeure dans la plupart des régions agricoles du pays.

Puisqu'il est prévu que les contraintes qui pèsent sur les ressources en eau iront en s'intensifiant, l'agriculture et les autres secteurs doivent collaborer pour trouver des méthodes plus efficaces et plus durables de gestion de l'utilisation et de la consommation de l'eau. Un tel effort passe par une meilleure surveillance de l'eau afin de fournir aux décideurs et aux parties prenantes les renseignements nécessaires à une gestion plus efficace de l'eau. Cependant, le Canada ne dispose pas à l'heure actuelle des données et du niveau de coordination intergouvernementale nécessaires à une compréhension adéquate des dimensions qualitatives et quantitatives des ressources en eau douce au pays, surtout dans les régions moins peuplées, ou de l'utilisation actuelle de l'eau par le secteur agricole et de ses besoins futurs en eau.

Le comité d'experts est d'avis que des améliorations au chapitre de la surveillance et de la modélisation de la quantité et de la qualité de l'eau permettraient une meilleure prise en charge des risques qui se posent pour l'agriculture. De tels renseignements ont importance critique pour éclairer l'élaboration de stratégies de gestion adaptative, qui seront essentielles pour aider les producteurs agricoles, les responsables des politiques et les autres intervenants à composer avec l'incertitude accrue des conditions du marché, du climat et des autres facteurs de risque. Le comité d'experts soutient par ailleurs que la mise en place de moyens intégrés de surveillance et de prévision pour l'eau et le climat pourraient contribuer fortement à la capacité du Canada de gérer de manière durable ses ressources hydriques pour la production agricole, en produisant de précieux renseignements pour atténuer les risques, exploiter les possibilités qui s'offrent et éclairer les décisions en matière de politique et de gestion.



3. *Parvenir à une meilleure compréhension des interactions complexes entre la gestion des terres et les ressources hydriques, y compris l'évaluation de l'efficacité économique et environnementale des PGB et du potentiel de l'agriculture de conservation et d'une approche axée sur les services écosystémiques dans la gestion des ressources naturelles (y compris l'eau et les terres) (chapitre 4).*

L'agriculture peut faire sentir ses effets sur l'environnement physique de façons complexes, par le biais de l'irrigation, du travail du sol, du drainage et des autres pratiques de gestion des terres et de l'eau. Certains effets sur la quantité d'eau, la qualité de l'eau et les habitats soulèvent la controverse, mais demeurent mal compris et quantifiés. Un exemple est la perte de terres humides attribuable au drainage agricole, un problème qui peut être une source de conflit entre différents groupes au sein de la collectivité.

L'un des principaux problèmes affectant la qualité de l'eau provient des charges élevées en nutriments, notamment l'azote et le phosphore. Parmi les enjeux préoccupants qui se posent au Canada, il y a les concentrations élevées de phosphore dans les Prairies. Les effets connexes sur les rivières et les lacs englobent la prolifération d'algues, qui a des conséquences pour les écosystèmes, l'eau potable et les activités récréatives. D'autres effets sur la santé des écosystèmes, les activités de loisirs et la qualité de l'eau potable découlent notamment des concentrations élevées de nitrate dans des régions comme l'Île-du-Prince-Édouard, où les taux observés dans les eaux souterraines et certaines sources d'eau de surface dépassent les normes acceptables pour l'eau potable. De telles pressions se font sentir partout dans le monde; en Europe, une étude récente a révélé que les effets de l'azote réactif provenant de l'agriculture causaient des dommages environnementaux estimés à entre 20 et 150 milliards d'euros par année, comparativement à des avantages découlant de l'utilisation d'engrais azotés par les agriculteurs évalués à entre 10 et 100 milliards d'euros annuellement. Parmi les autres problèmes qui se posent, il y a les répercussions des agents pathogènes, des pesticides et des produits vétérinaires sur la qualité de l'eau.

À mesure que s'intensifieront les efforts pour accroître la production agricole, les problèmes liés à l'impact de l'agriculture sur l'eau et l'environnement se poseront avec plus d'acuité, notamment parce que d'autres pressions proviennent aussi de la croissance démographique, de l'expansion urbaine et du développement industriel.

Même si l'agriculture est associée à certains des effets sur la qualité de l'eau et de l'environnement qui découlent de la croissance des activités dans le monde, de nombreuses possibilités s'offrent pour gérer l'interface de l'agriculture et de l'environnement aquatique en haussant l'efficacité de l'utilisation de l'eau et en améliorant la protection de l'environnement. Les PGB, les innovations technologiques, les stratégies de gouvernance et les instruments de politique sont quelques-uns des moyens à notre disposition pour y arriver. Étant donné les diverses préoccupations exprimées concernant les effets néfastes de l'agriculture sur le milieu hydrique et les préoccupations que soulèvent plus particulièrement les nutriments, une question fondamentale dans l'optique des politiques sera de déterminer le potentiel des divers moyens comme les PGB, les technologies, les stratégies de gouvernance et les instruments de politique pour atténuer ces effets.

Les PGB fournissent aussi le contexte pour deux concepts connexes porteurs d'importants avantages en lien avec une diversification accrue du secteur agricole : l'agriculture de conservation, qui vise à créer des milieux résilients et productifs devant un avenir incertain, et une approche axée sur les services écosystémiques, qui reconnaît la valeur des services non commercialisables, comme le contrôle des crues, la qualité de l'eau et la diversité écologique. Ces visions plus larges du rôle de l'agriculture comme fournisseur d'une gamme plus étendue de biens et de services écosystémiques pour la société pourraient engendrer des avantages et des possibilités considérables pour l'industrie agricole.

Les grandes priorités de la recherche portent donc sur la quantification des effets des pratiques de gestion des terres agricoles sur la quantité d'eau, la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes, et le potentiel des PGB pour limiter ces effets. La problématique rejoint les aspects suivants :

- les répercussions des changements dans les méthodes de culture et de travail du sol sur les mécanismes de ruissellement et la qualité de l'eau à l'échelle locale et régionale;
- l'effet du drainage agricole et de la perte de terres humides sur les risques d'inondation, la résilience à la sécheresse, la qualité de l'eau et les habitats à l'échelle locale et régionale;
- les effets possibles des PGB sur les charges en nutriments dans les eaux de surface et les systèmes d'eaux souterraines.

Pour aborder cette dernière question, il faudra mener des recherches ciblées sur le rendement des PGB dans le but de quantifier leur efficacité aux niveaux local et régional, de trouver les meilleures façons d'encourager l'adoption de pratiques et de technologies durables, et d'évaluer les options pour assurer le partage des coûts et des avantages entre les parties prenantes, y compris le public. Le comité d'experts est d'avis qu'une vision du rôle de l'agriculture axée sur les services écosystémiques nécessiterait des données sur les rapports entre l'agriculture, les habitats et la biodiversité sensiblement meilleures que celles que nous avons maintenant.

4. *Améliorer les connaissances au sujet des technologies prometteuses au niveau de l'exploitation agricole et des priorités de la recherche, pour contribuer à une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'eau, à une réduction des effets sur l'environnement et à la prise de décisions d'investissement judicieuses par les gouvernements, l'industrie et les producteurs agricoles (chapitre 5).*

Les progrès de la technologie ont eu de profondes répercussions sur la productivité globale des systèmes agricoles, et les experts se montrent optimistes au sujet des gains de productivité futurs. Il existe au Canada tout un éventail de solutions technologiques axées sur l'irrigation, l'agriculture de précision et l'agriculture intelligente, la formulation des pesticides et des engrais, le traitement des eaux à bas coût et d'autres moyens pouvant contribuer à maximiser les possibilités et à gérer les risques en utilisant l'eau de manière plus efficace, en limitant les effets sur l'environnement et en améliorant la productivité et la résilience de l'agriculture.

Le comité estime que des recherches supplémentaires sont requises pour mieux comprendre les options prioritaires qui feraient la plus grande contribution en vue d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, d'atténuer les effets sur l'environnement et de hausser la productivité et la résilience de l'agriculture. Des recherches ciblées sont aussi nécessaires afin de mieux percevoir les options et les priorités convenant à chaque contexte agricole. Des projets de démonstration et des efforts de vulgarisation en milieu agricole s'imposent aussi pour accroître l'adoption et l'application réussies d'avancées technologiques et d'autres fruits de la recherche.

5. *Mettre en place les fondements de la durabilité en adoptant des structures de gouvernance, des techniques d'évaluation, des stratégies de transfert du savoir et des incitatifs économiques appropriés pour favoriser de meilleures décisions de gestion, appuyer l'adoption de pratiques durables et permettre aux collectivités agricoles de nouer des rapports de travail étroits avec les autres secteurs et intervenants en vue de résoudre les problèmes intersectoriels (chapitre 6).*

À la lumière de ses recherches et de ses délibérations, le comité d'experts est arrivé à la conclusion qu'une gouvernance efficace est une condition essentielle à la gestion durable de l'eau en agriculture. Au Canada, la gouvernance de l'eau est très fragmentée et les responsabilités sont partagées entre les divers paliers de gouvernement. Il y a actuellement une grande variété de modèles de gouvernance de l'eau, y compris les cadres réglementaires traditionnels, les processus de collaboration, les mécanismes du marché et des combinaisons des trois. Les rôles assumés par les acteurs non gouvernementaux, les peuples autochtones, les groupes de la société civile et les entreprises ont acquis plus d'importance et ils ont évolué par rapport aux décennies antérieures. En conséquence, toute une série de défis nouveaux se posent sur les plans de l'efficacité, de la capacité, de la légitimité et de l'imputabilité des décisions de gestion. Enfin, il y a une compréhension inégale de la meilleure façon de s'attaquer à ces défis.

En raison des différences qui existent entre les régimes juridiques, les cadres institutionnels et les contextes socio-économiques des différentes régions du pays, il n'y a pas de solution unique pouvant être appliquée efficacement dans toutes les sphères de compétence. Le comité d'experts s'est donc tourné vers des pratiques et des principes prometteurs dont l'efficacité a été démontrée pour appuyer une gestion durable des ressources hydriques, dont les suivants :

- S'assurer que la gouvernance se situe à l'échelle appropriée, ce qui pourra aider à faciliter la coordination des efforts de gestion entre les gouvernements et les parties prenantes.
- Intégrer la planification de l'utilisation des terres aux décisions touchant à la gestion de l'eau pourrait faciliter l'intégration des besoins des multiples utilisateurs tout en assurant une gestion durable de l'eau à plus long terme.
- Intégrer les connaissances au processus décisionnel (y compris les connaissances scientifiques, traditionnelles et locales) pourrait favoriser des solutions plus robustes tenant compte de la nature complexe et interdépendante des défis actuels de la gestion et de la gouvernance de l'eau. La recherche transdisciplinaire,

dans laquelle les chercheurs et les partenaires de la collectivité agricole, de l'industrie et du gouvernement définissent conjointement les problèmes et les programmes de recherche, est un important moyen pour faciliter la coproduction de connaissances.

La politique agricole influe fortement sur les décisions des intervenants qui concernent l'utilisation de l'eau en agriculture, en cherchant souvent à assurer la compétitivité économique du secteur tout en tenant compte des préoccupations environnementales et sociales. Les expériences observées un peu partout au Canada et ailleurs dans le monde montrent que les instruments économiques – lorsqu'ils sont conçus et déployés de manière appropriée – peuvent concourir à l'objectif d'une gestion durable de l'eau. Le comité a examiné le potentiel des techniques d'évaluation économique, des incitatifs économiques, de la tarification et des marchés de l'eau sous l'angle de leur contribution à la gestion durable de l'eau en agriculture. Il faudrait étudier la façon dont ces outils pourraient être utilisés efficacement dans le contexte canadien ainsi que les mécanismes permettant d'en mesurer le succès.

Les décisions relatives à la gouvernance de l'eau doivent aussi intégrer les points de vue et les opinions des groupes intéressés. La mobilisation de ces groupes devrait s'appuyer à la fois sur la diffusion d'information parmi le public et la promotion d'un sens des responsabilités pour la gestion durable de l'eau. En conséquence, le comité d'experts fait valoir que la recherche sur les stratégies de transfert de connaissances touchant l'agriculture et l'utilisation de l'eau pourrait contribuer à améliorer les communications entre les responsables des politiques et les groupes intéressés (y compris le public). Cela aura une importance critique pour solutionner les problèmes intersectoriels liés à la gestion durable de l'eau pour la production agricole.

## **POUR L'AVENIR**

Dans le domaine de la production agricole, la combinaison de possibilités, de risques et d'incertitudes varie selon les sous-secteurs et les régions. Les responsables des politiques doivent donc appliquer des solutions adaptées aux circonstances particulières de chaque cas. Cela nécessite des recherches supplémentaires, du temps et des investissements. Il faudra également une action concertée de la part de tous les intéressés dans leur domaine de responsabilité respectif, conjuguée à un souci de collaboration pour coordonner les activités et intégrer les connaissances

en provenance des diverses administrations. Devant la nécessité de se préparer pour l'avenir, il est essentiel que ces efforts débutent sans délai, afin que le secteur agricole canadien demeure résilient et continue d'être un chef de file en matière de productivité et d'innovation, et qu'il fasse une importante contribution à la croissance économique, à la sécurité alimentaire et au bien-être des collectivités locales au Canada.

## Table des matières

<b>Chapitre 1 – Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Mandat confié au comité d’experts .....	4
1.2 Démarche du Conseil .....	5
1.3 Portée de l’évaluation et définitions clés .....	5
1.4 Structure du rapport .....	9
<b>Chapitre 2 – Les contextes mondial et canadien de l’eau en agriculture .....</b>	<b>11</b>
2.1 Le contexte mondial : possibilités et défis .....	12
2.2 Le contexte canadien : l’eau, le climat et les dimensions économique et sociale .....	22
2.3 Saisir les occasions et faire face aux défis : une gestion adaptative .....	38
<b>Chapitre 3 – Connaissances entrant dans les décisions de gestion : la quantité et la qualité des ressources hydriques du Canada et les besoins au niveau de la surveillance, de la modélisation et de la gestion adaptative .....</b>	<b>40</b>
3.1 La gestion de l’eau aux fins de l’agriculture au Canada .....	42
3.2 Problèmes liés à la quantité d’eau : disponibilité de l’eau et utilisations concurrentes .....	47
3.3 Les problèmes de qualité de l’eau : les nutriments, les pesticides, les agents pathogènes et les autres facteurs de risque .....	53
3.4 Le besoin d’éclaircir la gestion de l’eau à l’aide de renseignements sur la quantité, l’utilisation et la qualité de l’eau .....	66
3.5 L’état de la surveillance de la quantité d’eau et de la qualité de l’eau au Canada .....	69
3.6 Le rôle de la modélisation, de la prévision et de la gestion adaptative .....	82
<b>Chapitre 4 – La gestion des terres et de l’eau : les pratiques de gestion bénéfiques et la durabilité de l’agriculture .....</b>	<b>90</b>
4.1 Changements dans l’utilisation et la gestion des terres .....	93
4.2 La gestion de l’eau dans le sol : irrigation et drainage .....	100
4.3 Les pratiques de gestion bénéfiques .....	108
4.4 Nouvelles perspectives pour l’agriculture durable au Canada – l’agriculture de conservation et l’approche axée sur les services écosystémiques .....	120

<b>Chapitre 5 – Technologies prometteuses à l'échelle de la ferme : améliorer la productivité de l'eau et atténuer les effets sur l'environnement.....</b>	<b>130</b>
5.1 Technologies d'irrigation .....	135
5.2 Le paillage.....	138
5.3 La récolte de l'eau de pluie et de la neige soufflée par le vent.....	140
5.4 Déchets agricoles et traitement des eaux de drainage .....	141
5.5 Utilisation de ressources hydriques dégradées et de biosolides.....	147
5.6 Semences génétiquement améliorées, végétaux à caractères nouveaux et autres biotechnologies.....	148
5.7 Technologies à l'appui d'une agriculture de précision .....	152
5.8 Formulation des engrais et des pesticides .....	159
5.9 Régulateurs de la croissance des plantes et osmolytes .....	162
5.10 Stabilisateurs de sol.....	163
5.11 Nanotechnologies.....	164
5.12 Technologies d'élevage.....	164
<b>Chapitre 6 – Bâtir les assises d'une gestion durable de l'eau en agriculture .....</b>	<b>167</b>
6.1 L'évolution du contexte de la gouvernance et de la gestion de l'eau au Canada.....	168
6.2 Instruments économiques à l'appui d'une gestion durable de l'eau .....	181
6.3 Transfert de connaissances et stratégies de mobilisation des parties intéressées.....	191
6.4 L'emploi d'outils efficaces de gouvernance et d'élaboration des politiques à l'appui d'une gestion durable de l'eau en agriculture.....	198
<b>Chapitre 7 – Conclusion .....</b>	<b>201</b>
7.1 Question principale.....	206
7.2 Sous-questions.....	208
7.3 Réflexions finales .....	228
<b>Références .....</b>	<b>230</b>



# 1

## Introduction

- Mandat confié au comité d'experts
- Démarche du Conseil
- Portée de l'évaluation et définitions clés
- Structure du rapport

## 1. Introduction

L'avenir laisse entrevoir des possibilités considérables pour le secteur agricole. La croissance de la population mondiale devrait plus que doubler la demande de produits alimentaires d'ici 2050 (de Fraiture *et al.*, 2007; FAO, 2009). L'innovation crée de nouveaux marchés pour les biocarburants, les bioproduits industriels et les autres produits agricoles non alimentaires (AAC, 2011a; Boehlje et Bröring, 2011; Knickel *et al.*, 2009). En outre, l'augmentation des revenus devrait stimuler la demande pour toutes les catégories de biens agricoles (de Fraiture *et al.*, 2007; UNESCO, 2009).

Le Canada peut profiter de ces marchés qui s'ouvrent à l'échelle mondiale. Avec des ventes annuelles de 35,2 milliards de dollars, le Canada est le quatrième exportateur de produits agricoles et agroalimentaires (y compris les aliments et les autres produits agricoles non alimentaires) en importance, après l'Union européenne, les États-Unis et le Brésil<sup>1</sup>. L'agriculture primaire a engendré à elle seule des revenus agricoles bruts de 51,1 milliards de dollars en 2011 (Statistique Canada, 2012). Le « secteur alimentaire » au sens large (qui comprend la transformation des aliments, les boissons, les services alimentaires et la vente d'aliments en gros et au détail), dans lequel l'agriculture primaire joue un rôle clé, touche 1 emploi sur 7,5 au Canada et engendre près de 100 milliards de dollars d'activité économique (AAC, 2011c; Conference Board du Canada, 2011).

Mais pour exploiter ces possibilités, le secteur agricole canadien devra gérer avec prudence son interaction avec l'environnement, en particulier avec l'eau. L'eau est essentielle à l'agriculture, sous forme de précipitations ou d'irrigation pour les cultures et pour abreuver les animaux d'élevage. Simultanément, les activités agricoles ont des répercussions sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau. L'agriculture est un important consommateur d'eau (66 % de la consommation totale d'eau au Canada) (TRNEE, 2010a) et occupe une large part du paysage rural (avec le potentiel d'améliorer ou de dégrader la qualité de l'environnement) (Eilers *et al.*, 2010; Molden *et al.*, 2007a). On pense généralement que le Canada possède d'abondantes réserves hydriques (Sprague, 2007). Mais en réalité la plus grande partie de cette eau se trouve dans des régions où il n'y a pas d'agriculture (Kreutzweiser et de Loë, 2010). Plusieurs grandes régions agricoles du Canada, notamment certaines parties des Prairies et de la Colombie-Britannique, sont déjà soumises à un stress hydrique, et des préoccupations ont surgi au sujet de qualité de l'eau dans presque toutes les régions agricoles du pays (AAC, 2007a; TRNEE, 2010a; Stewart *et al.*, 2011).

---

1 Calculs fondés sur AAC, 2011c.

L'eau et l'environnement rural sont aussi nécessaires à de nombreux autres secteurs d'activité économique et humaine. Les centres urbains, les utilisateurs industriels, les activités récréatives à l'extérieur et la faune dépendent tous de sources d'eau propre et de territoires utilisables. L'eau est également essentielle à la production d'énergie (p. ex. pour la production d'énergie hydroélectrique et le refroidissement des stations thermiques). Afin d'assurer la prospérité dans les années à venir, les producteurs agricoles, les collectivités rurales et urbaines, les utilisateurs d'eau industriels, les ministères provinciaux/territoriaux et fédéraux et les autres parties prenantes doivent travailler de concert pour que l'eau soit gérée de manière durable. En particulier, la dépendance de l'agriculture à l'égard de l'eau et son impact sur cette ressource (au niveau de la qualité et de la quantité) est une problématique d'importance critique pour la viabilité du secteur agricole, des collectivités rurales et de l'économie canadienne.

Simultanément, le changement climatique, l'évolution rapide des conditions du marché et les perceptions changeantes du public engendrent une incertitude considérable pour le secteur agricole (AAC, 2011a; Motha et Baier, 2005; Rude et Meilke, 2006; Sarris, 2009). Les conséquences de ces changements sur les niveaux de production, le coût des intrants et la rentabilité seront positives dans certains domaines mais négatives dans d'autres<sup>2</sup>. Le secteur agricole et les autres intervenants doivent donc avoir une idée plus claire des risques engendrés par ces changements et de la façon dont ils peuvent être gérés<sup>3</sup>.

Comment aborder ces défis? La collectivité internationale de l'eau a reconnu que notre bien-être dépendait d'une utilisation et d'une gestion *durables* de l'eau (UNESCO, 2009). Cela signifie que le secteur agricole canadien devra devenir un chef de file de la gestion durable de l'eau, définie par Environnement Canada comme étant « l'utilisation de l'eau douce de manière efficiente et équitable, conformément aux besoins sociaux, économiques et environnementaux des générations actuelles et futures » (Environnement Canada, 1987). Pour atteindre ce but, il faudra miser sur le savoir, l'innovation et l'intégration des idées, des pratiques et du savoir-faire provenant de plusieurs domaines des sciences sociales, des sciences de la santé, des sciences naturelles et du génie.

Le Canada doit d'abord définir clairement « les besoins des générations actuelles et futures », ainsi que les instruments appropriés pour définir ces besoins et susciter l'action sociale requise pour les combler. Comprendre les interactions entre le secteur agricole, l'environnement, l'économie et la société revêt aussi une importance cruciale,

---

2 Sur la question des répercussions du changement climatique, voir RNCAN, 2004; TRNEE, 2010b. Pour ce qui est des marchés et des perceptions du public, voir AAC, 2011a; Sarris, 2009.

3 Pour un exemple de l'éventail de scénarios possibles, voir Flörke et Eisner, 2011.

afin de pouvoir déterminer les véritables arbitrages qui sous-tendent les décisions à prendre. Il est tout aussi important de savoir comment l'agriculture peut réaliser des gains d'efficacité en exploitant les dernières technologies et en adoptant des pratiques de gestion bénéfiques (PGB), de manière à répartir les coûts équitablement entre tous les bénéficiaires. Une gouvernance et une gestion efficaces sont aussi requises parce que plusieurs défis qui confrontent le secteur agricole sont imputables à des lacunes dans la prise de décisions au sujet de l'eau. La fragmentation des responsabilités entre les gouvernements, la faiblesse des institutions et le manque de coordination sont quelques-uns des problèmes de gouvernance qui doivent être résolus pour parvenir à une gestion durable de l'eau. Les efforts d'acquisition de connaissances nouvelles devraient porter sur ces aspects pour aider à atteindre l'objectif d'un secteur agricole concurrentiel, innovateur et durable (AAC, 2011a, 2011b). Il est également urgent que le Canada agisse sans délai pour guider la prochaine ronde d'investissements au niveau des politiques, des programmes et de l'infrastructure vers la mise en place d'un cadre de gestion durable de l'eau en agriculture.

### 1.1 MANDAT CONFIE AU COMITÉ D'EXPERTS

Afin d'aider le Canada à se préparer à saisir ces occasions et à relever ces défis, le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire (le commanditaire) a demandé au Conseil des académies canadiennes (CAC) de réunir un comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada (le comité) pour examiner la question suivante :

*Quelles études scientifiques supplémentaires sont nécessaires pour mieux encadrer la gestion durable de l'eau, afin de répondre aux besoins de l'industrie agricole?*

Au-delà de la question principale, les sous-questions suivantes ont été formulées :

- *Quel est l'état des ressources hydriques au Canada en vue de leur utilisation à des fins agricoles au pays, et quel rôle jouent à cet égard les principales sources de demande concurrentes en milieu rural, comme la consommation de l'industrie locale et l'utilisation à des fins récréatives?*
- *Que devons-nous savoir de plus au sujet du cycle de l'eau et de l'utilisation de l'eau afin de comprendre le niveau adéquat et la valeur des approvisionnements en eau dans les régions rurales?*
- *Quelles connaissances supplémentaires sont requises pour comprendre les pratiques durables et les effets néfastes possibles en lien avec l'utilisation de l'eau dans les régions rurales?*

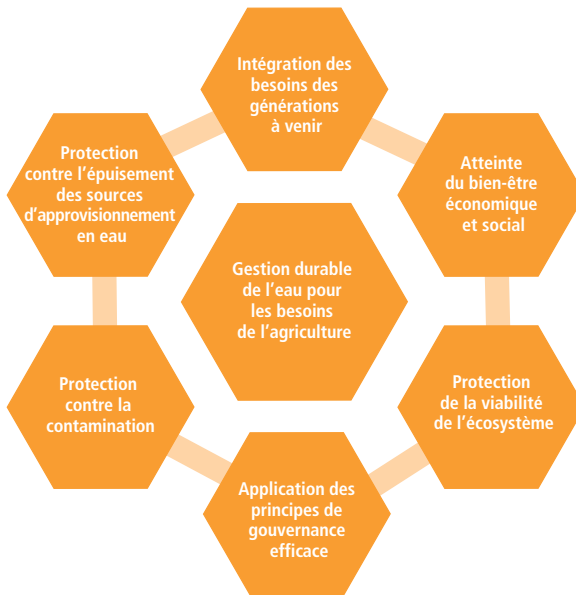
- *Quelles connaissances et méthodes de surveillance supplémentaires sont requises afin de progresser dans la collecte et l'application de données biophysiques pour optimiser l'utilisation de l'eau?*
- *Quelles autres informations et analyses socio-économiques et environnementales doivent être prises en compte dans la gestion durable de l'eau en milieu rural?*

## 1.2 DÉMARCHE DU CONSEIL

Dans le but de répondre aux questions posées par le commanditaire, le Conseil des académies canadiennes a réuni un comité multidisciplinaire formé de spécialistes canadiens et étrangers ayant une expertise en hydrologie, en agriculture, en climatologie, en génie, en économie, en gestion et gouvernance de l'eau et dans d'autres domaines. Au cours de ses délibérations initiales, le comité d'experts a recueilli et analysé des données sur des sujets tels que les ressources hydriques du Canada, l'avenir de l'eau en agriculture et dans d'autres industries, l'agriculture et l'environnement, les pratiques de gestion bénéfiques (PGB) au Canada et dans d'autres pays, les tendances de la technologie et de l'innovation, les cadres de politique publique, ainsi que les principes qui se sont révélés utiles pour intégrer les valeurs des parties prenantes dans les décisions relatives à la gestion de l'eau. Les renseignements recueillis lors de cet examen ont été combinés à l'expertise, à l'expérience et au jugement des membres du comité d'experts. Le rapport préliminaire issu de ces travaux a été soumis à un rigoureux processus d'examen par les pairs auprès d'experts canadiens et étrangers provenant d'un large éventail de domaines pertinents à cette évaluation. Le rapport final intègre les observations des examinateurs.

## 1.3 PORTÉE DE L'ÉVALUATION ET DÉFINITIONS CLÉS

La portée de cette évaluation fondée sur des données probantes est déterminée par les questions du commanditaire ainsi que par les définitions d'un certain nombre de concepts clés. L'évaluation a tenu compte du fondement scientifique nécessaire à une gestion durable l'eau en agriculture pour l'avenir. La *science* est interprétée ici au sens large et englobe les sciences naturelles, les sciences sociales et les sciences de la santé, de même que le génie et les sciences humaines, soit l'ensemble des disciplines qui nous aident à comprendre comment mieux gérer les ressources hydriques pour répondre aux besoins de la production agricole et des autres utilisateurs. Tel qu'énoncé précédemment, la gestion durable de l'eau en agriculture signifie pouvoir répondre « aux besoins sociaux, économiques et environnementaux des générations présentes et futures » (Environnement Canada, 1987). L'évaluation antérieure du CAC, intitulée *La gestion durable des eaux souterraines au Canada* (CAC, 2009), précise par ailleurs que la gestion durable comporte cinq volets : 1) la protection contre l'épuisement des sources d'approvisionnement en eau; 2) la protection contre de la contamination; 3)



Adapté de CAC, 2009

**Figure 1.1**

### Éléments de la gestion durable de l'eau pour les besoins de l'agriculture

Cette figure représente les cinq éléments de l'évaluation *La gestion durable des eaux souterraines au Canada*. Le comité d'experts a ajouté un sixième élément pour compléter la figure, soit l'intégration des besoins des générations à venir.

la protection de la viabilité de l'écosystème; 4) l'atteinte du bien-être économique et social; 5) l'application des principes de gouvernance efficace. Dans le présent rapport, le comité a intégré chacune de ces considérations dans sa définition de la durabilité et y a ajouté un sixième élément : l'intégration des besoins des générations à venir (voir la figure 1.1).

Aux fins de la présente évaluation, le comité d'experts a défini le *secteur agricole* comme étant la production primaire (les cultures et l'élevage). Il ne comprend pas la transformation secondaire en produits alimentaires (p. ex. les boulangeries et les usines de mise en conserve) ou la chaîne de valeur agricole et agroalimentaire au sens large – dont les fournisseurs d'intrants et de services (p. ex. les entreprises de pesticides, les banques et les compagnies d'assurances), la vente d'aliments en gros et au détail, ainsi que les industries de services alimentaires. Le comité d'experts est d'avis que cette définition est celle qui reflète le mieux la préoccupation du commanditaire au

sujet de l'utilisation de l'eau dans le secteur agricole primaire<sup>4</sup>. Cela dit, le comité souligne que l'agriculture primaire fait une contribution importante à la chaîne de valeur agricole et agroalimentaire et à l'économie en général. Tel que convenu avec le commanditaire au début de l'évaluation, le comité n'a fait aucune distinction entre les demandes urbaines, agricoles et rurales d'eau dans son rapport parce qu'elles font partie du même système hydrologique.

Il y a une importante distinction à faire entre l'*utilisation de l'eau* et la *consommation de l'eau*. L'*utilisation de l'eau* comprend les utilisations dans les cours d'eau et les prélèvements faits dans les cours d'eau (utilisations hors des cours d'eau). Les utilisations dans les cours d'eau correspondent à celles où l'eau est utilisée dans son cadre naturel, par exemple la navigation de plaisance, les loisirs aquatiques et la production d'énergie hydroélectrique (Environnement Canada, 2011a; Kohli *et al.*, 2010; Turner *et al.*, 2004). Les utilisations correspondant à des prélèvements sont celles où l'eau est retirée de son cadre naturel (p. ex. une source puisant dans une rivière ou une nappe d'eau souterraine) et utilisée par exemple pour des activités industrielles ou l'irrigation agricole (Environnement Canada, 2011a; Kohli *et al.*, 2010; Turner *et al.*, 2004). Les utilisations donnant lieu à de prélèvements peuvent « consommer » une partie ou la totalité de l'eau puisée à la source, ce qui signifie que l'eau prélevée n'est pas entièrement retournée à sa source.

Des exemples de *consommation d'eau* sont notamment l'eau qui s'évapore durant une utilisation industrielle, l'eau absorbée par les plantes et le bétail, l'eau intégrée à des produits comme les aliments et les boissons, et l'eau prélevée à des fins d'irrigation et perdue dans l'atmosphère par évapotranspiration (Environnement Canada, 2011f; USGS, 2008). La partie des prélèvements d'eau agricole qui est intégrée à des produits vendus hors du Canada entre dans le flux mondial « d'eau virtuelle » (Chapagain et Hoekstra, 2008).

Dans une région donnée, les diverses utilisations humaines de l'eau peuvent rivaliser pour les mêmes ressources hydriques et aussi être en concurrence avec les besoins des écosystèmes. L'utilisation « consommatrice » est un exemple, mais il y en a d'autres. Les débits et les niveaux d'eau modifiés par la présence d'un barrage – une forme d'utilisation dans le cours d'eau – peuvent influencer sur la viabilité des écosystèmes locaux et la qualité et la disponibilité de l'eau pour d'autres usages (Environnement Canada, 2011a; Young, 1996). L'eau retournée dans l'environnement après avoir été prélevée peut aussi être de moins bonne qualité, comme dans le cas des effluents renfermant des déchets humains, animaux ou industriels (Environnement Canada, 2010c). Le comité a pris en considération toutes ces utilisations au moment d'analyser la gestion

---

4 Pour des définitions de l'*agriculture* et des autres sous-secteurs, voir AAC, 2011c.

durable de l'eau dans les territoires agricoles. Ces utilisations humaines, s'ajoutant aux besoins des écosystèmes, définissent l'expression *utilisations concurrentes* employée dans le présent rapport.

Aux fins du rapport, le comité a examiné les tendances et les possibilités pertinentes à la gestion durable de l'eau en agriculture à l'horizon 2050 (p. ex. la demande accrue pour la production alimentaire et les autres produits agricoles; la concurrence pour les ressources hydriques provenant des utilisations non agricoles telles que l'industrie, les municipalités et l'énergie hydroélectrique, ainsi que l'impact potentiel du changement climatique)<sup>5</sup>. Au-delà de cet horizon, l'incertitude est si grande qu'elle rend la plupart des analyses trop conjecturales étant donné les changements potentiels dans la demande, les conditions climatiques, les technologies et d'autres facteurs. Incidemment, le comité d'experts reconnaît qu'il y a un fort élément d'incertitude dans les prévisions du marché pour les produits de base et de la variabilité du climat d'ici 2050. Néanmoins, le comité est d'avis que l'élaboration des politiques et la prise de décisions pourraient profiter de l'éclairage qu'apporteraient des données scientifiques au sujet de ces scénarios possibles.

La répartition future de l'eau sera déterminée non seulement par les impératifs économiques et les conditions du marché, mais aussi par les valeurs sociales et les considérations éthiques. De nombreux outils économiques (p. ex. les incitatifs monétaires, les modalités commerciales) et instruments de politique (p. ex. les cadres de réglementation, les structures de gouvernance) pourraient être employés pour atteindre des objectifs tels qu'une utilisation durable de l'eau, une plus grande compétitivité économique et un niveau accru d'innovation. La société devra évaluer les objectifs qu'elle souhaite le plus atteindre et leur attribuer un ordre de priorité. Les gouvernements et les groupes intéressés devront aussi communiquer efficacement et forger des consensus sur la nature des objectifs qui offrent les meilleures perspectives économiques, environnementales et sociales pour le plus grand nombre d'intéressés, notamment le public canadien. Ce processus d'évaluation et de prise de décision requiert trois grands intrants :

1. Une expertise et des connaissances scientifiques pour comprendre objectivement les faits ayant trait à la qualité de l'eau et à la disponibilité présente et future de l'eau, les possibilités et les tendances technologiques et les possibilités et les tendances économiques.

---

5 Pour ce qui est de ces tendances et possibilités, voir GIEC, 2007; UNESCO, 2009, 2012, ainsi que l'analyse présentée au chapitre 2.



2. Les stratégies de gouvernance et les instruments de politique pour assurer une prise de décisions efficace dans la gestion de l'eau et pour influencer les comportements.
3. Une mobilisation réelle des parties prenantes dans le secteur agricole primaire et d'autres groupes d'utilisateurs de l'eau (p. ex. les industries, les collectivités, les responsables des bassins hydrauliques, les ministères provinciaux et fédéraux et le public) afin de déterminer quelles sont les pratiques de gestion, les technologies, les instruments de politique et les structures de gouvernance qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats possibles pour les divers groupes intéressés et le public.

Pour toutes ces raisons, le comité d'experts a adopté une interprétation très large des connaissances économiques, technologiques, environnementales et sociales mentionnées dans les sous-questions et nécessaires à une gestion durable de l'eau en agriculture. Le comité s'est également employé à souligner les pratiques prometteuses pour l'intégration de ces domaines de connaissances tout au long du rapport.

#### **1.4 STRUCTURE DU RAPPORT**

Le rapport est structuré en fonction des grands enjeux que le comité d'experts a retenus pour faire l'objet d'un examen en vue de répondre aux questions posées par le commanditaire. Le chapitre 2 (Les contextes mondial et canadien de l'eau en agriculture) débute par une description des principaux facteurs mondiaux qui influenceront sur l'avenir du secteur agricole et une analyse des conséquences de ces facteurs dans le contexte canadien. Ce chapitre montre que si les prochaines décennies offriront des occasions exceptionnelles à l'agriculture canadienne, il faudra aussi gérer judicieusement des incertitudes et des risques significatifs pour assurer la viabilité de ce secteur.

Le chapitre 3 (Connaissances entrant dans les décisions de gestion) poursuit en examinant ce que nous savons et ce que nous devrions savoir pour gérer de façon durable les ressources hydriques en milieu agricole. Le chapitre révèle que plusieurs régions agricoles au pays subissent déjà un stress hydrique, et il énumère une série de menaces potentielles à la disponibilité et à la qualité de l'eau qu'il importe de mieux comprendre pour promouvoir une gestion durable de l'eau en agriculture. Il met en évidence les limites des mécanismes actuels de surveillance, d'évaluation et de modélisation. Des mesures visant à surmonter ces limites assureraient le soutien essentiel à l'amélioration de la gestion quantitative et qualitative de l'eau. De sérieuses incertitudes liées au changement climatique entourent la gestion des terres et de l'eau; de nouvelles approches axées sur une gestion adaptative seront donc requises.

Le chapitre 4 (La gestion des terres et de l'eau) explore l'interdépendance de la gestion des terres et de l'eau. Il explique comment les modèles d'utilisation du territoire, les pratiques de drainage, l'irrigation et les autres décisions liées à la gestion des terres et de l'eau influent sur la demande d'eau, la productivité agricole, la qualité de l'eau et les écosystèmes, et se répercutent ainsi sur diverses variables économiques, environnementales et sociales. Il analyse la façon dont les PGB peuvent donner de meilleurs résultats pour un éventail de parties prenantes, tout en notant qu'à l'instar de toute décision de gestion, ces pratiques doivent faire l'objet d'une évaluation systématique et continue afin de déterminer leurs effets cumulatifs sur le milieu aquatique. Le chapitre se termine par un examen de la nécessité d'évoluer vers une approche axée sur l'agriculture de conservation, qui privilégie la diversité en favorisant des systèmes de production plus robustes et plus résilients et une perspective de l'agriculture fondée sur les services écosystémiques. Dans cette perspective, l'agriculture et les producteurs agricoles ne sont pas perçus simplement comme des lieux et personnes qui produisent des aliments, mais comme des lieux et des personnes qui contribuent à soutenir et à maintenir des espaces procurant un grand nombre de services écosystémiques souhaités par la société.

Le chapitre 5 (Technologies prometteuses à l'échelle de la ferme) met l'accent sur les solutions technologiques prometteuses qui pourraient contribuer à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et à atténuer les répercussions environnementales de la production agricole. Bien que la diversité et la complexité du secteur agricole canadien signifient que seulement certaines technologies conviendront aux conditions locales et à des sous-secteurs donnés, le but visé est de présenter un ensemble de possibilités globales qui pourront être adaptées selon que les producteurs, les responsables des politiques et les groupes intéressés le jugeront approprié.

Le chapitre 6 (Bâtir les assises d'une gestion durable de l'eau en agriculture) scrute la problématique de l'intégration des valeurs économiques, des besoins environnementaux et des attentes sociales dans les décisions portant sur la gestion de l'eau. Il décrit comment les structures de gouvernance, les méthodes d'évaluation, les incitatifs économiques et les stratégies de transfert de connaissances qui tiennent compte de ces valeurs peuvent permettre d'atteindre l'objectif d'une utilisation viable de l'eau en agriculture. Ce faisant, le chapitre souligne que la réalisation d'un ensemble d'objectifs particuliers requiert, au point de départ, une formulation claire de ces objectifs et la mobilisation des groupes concernés.

Enfin, le chapitre 7 (Conclusion) vient compléter l'analyse en donnant un aperçu des principaux risques, des possibilités, des besoins de recherche et des mesures requises qui ont été examinés tout au long du rapport, en résumant les réponses fournies par le comité d'experts à la question principale et aux sous-questions posées par le commanditaire.

# 2

## **Les contextes mondial et canadien de l'eau en agriculture**

- **Le contexte mondial : possibilités et défis**
- **Le contexte canadien : l'eau, le climat et les dimensions économique et sociale**
- **Saisir les occasions et faire face aux défis : une gestion adaptative**

## 2 Les contextes mondial et canadien de l'eau en agriculture

### Aperçu

L'augmentation de la demande pour les produits alimentaires et les autres produits agricoles engendrera de nombreuses possibilités pour le secteur agricole dans les décennies à venir. Afin de tirer le maximum des possibilités, des risques et des incertitudes à l'échelle mondiale – liés, par exemple, aux conditions changeantes du marché, à la concurrence accrue pour les ressources en terres et en eau, et au changement climatique – il faudra pratiquer une gestion prudente pour assurer la viabilité du secteur agricole canadien. Les approches traditionnelles, fondées sur des prévisions, servant à l'élaboration des politiques comportent de sérieuses limites pour gérer un avenir incertain. Le comité d'experts est d'avis que les principes de gestion adaptative offrent un cadre conceptuel utile pour mieux faire face à ces risques et incertitudes.

Dans le but de déterminer quelles connaissances scientifiques supplémentaires sont requises pour assurer une gestion durable de l'eau en agriculture au Canada, il faut d'abord comprendre les principaux facteurs à l'échelle mondiale qui influent sur l'avenir du secteur agricole, ainsi que les contextes économiques, environnementaux et sociaux dans lesquels s'inscrit ce secteur au Canada (voir la figure 2.1). La section 2.1 s'appuie sur ce cadre conceptuel pour explorer les répercussions éventuelles des principaux déterminants mondiaux, tandis que la section 2.2 donne un aperçu du contexte canadien. La section 2.3 conclut ensuite en décrivant les principaux domaines où, selon le comité d'experts, il faudrait disposer de données scientifiques supplémentaires pour tirer parti des possibilités qui s'offriront à l'échelle mondiale tout en guidant mieux la gestion durable de l'eau en agriculture.

### 2.1 LE CONTEXTE MONDIAL : POSSIBILITÉS ET DÉFIS

#### Les possibilités à l'échelle mondiale : la demande accrue pour les aliments et les autres produits agricoles

La croissance démographique, la hausse des revenus, l'évolution des habitudes alimentaires et l'apparition de nouveaux marchés pour les produits agricoles non alimentaires ouvriront des débouchés considérables au secteur agricole pour plusieurs décennies à venir<sup>6</sup>. Selon l'Organisation des Nations Unies,

6 Pour un aperçu des principales tendances, voir Björklund *et al.*, 2009; de Fraiture et Wichelns, 2010; de Fraiture *et al.*, 2007; Foley *et al.*, 2011.

la population mondiale devrait atteindre 9,3 milliards de personnes en 2050 (contre 6,9 milliards en 2010) (ONU, Département des affaires économiques et sociales, 2011). La croissance démographique se traduira par une hausse de la demande d'aliments. Simultanément, la hausse des revenus dans les pays en développement devrait stimuler la demande de viande, de produits laitiers et d'autres produits agricoles à valeur élevée (et à teneur plus élevée en eau), parce que les gens ont tendance à acheter plus d'aliments et recherchent une alimentation plus variée avec l'augmentation du revenu par habitant (Kearney, 2010). Selon les prévisions, à mesure que les différents types d'aliments deviendront plus largement accessibles par suite du développement économique, la consommation moyenne d'aliments à haut coefficient énergétique, qui ont une teneur plus élevée en gras, en protéines, en sel et en sucre (et dont la production a aussi tendance à exiger une plus grande quantité d'eau), devrait aussi augmenter (Kearney, 2010).

Ces tendances pourraient avoir des répercussions notables sur l'utilisation de l'eau en agriculture. Selon des estimations, pour répondre à la demande croissante, la consommation annuelle d'eau destinée aux cultures devrait presque doubler (de Fraiture et Wichelns, 2010). Ces estimations de base ne supposent aucun gain d'efficacité dans l'utilisation de l'eau. Un scénario plus optimiste – qui prévoit des améliorations notamment au niveau de l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture irriguée et non irriguée, la réduction du gaspillage dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire et l'optimisation de la production des aliments à l'échelle régionale – indique que la consommation d'eau attribuable aux cultures ne devrait augmenter que d'environ 20 % (de Fraiture et Wichelns, 2010). Ces différences illustrent les effets positifs d'une amélioration éventuelle de la viabilité de la production agricole.

La demande de produits agricoles non alimentaires devrait aussi augmenter avec la croissance démographique et la hausse des revenus dans le monde. Les biocarburants, qui ne représentent aujourd'hui qu'environ 2 % de la superficie cultivée à l'échelle mondiale (de Fraiture *et al.*, 2008), en sont un exemple. Les progrès technologiques survenus au cours des dernières années ont facilité l'utilisation des biocarburants; les gouvernements et les entreprises ont encouragé l'adoption de ces carburants en vue d'atteindre des objectifs économiques, stratégiques et autres, et certains consommateurs ont migré vers ces produits à cause de leurs avantages perçus sur le plan environnemental<sup>7</sup>. En conséquence, l'utilisation des biocarburants a augmenté et pourrait poursuivre sur cette tendance dans l'avenir immédiat, bien que la possibilité d'une expansion à plus long

---

7 Sur les motifs à l'origine de l'adoption des biocarburants, voir de Fraiture *et al.*, 2008; de Fraiture et Wichelns, 2010; Laan *et al.*, 2009; Ragauskas *et al.*, 2006.

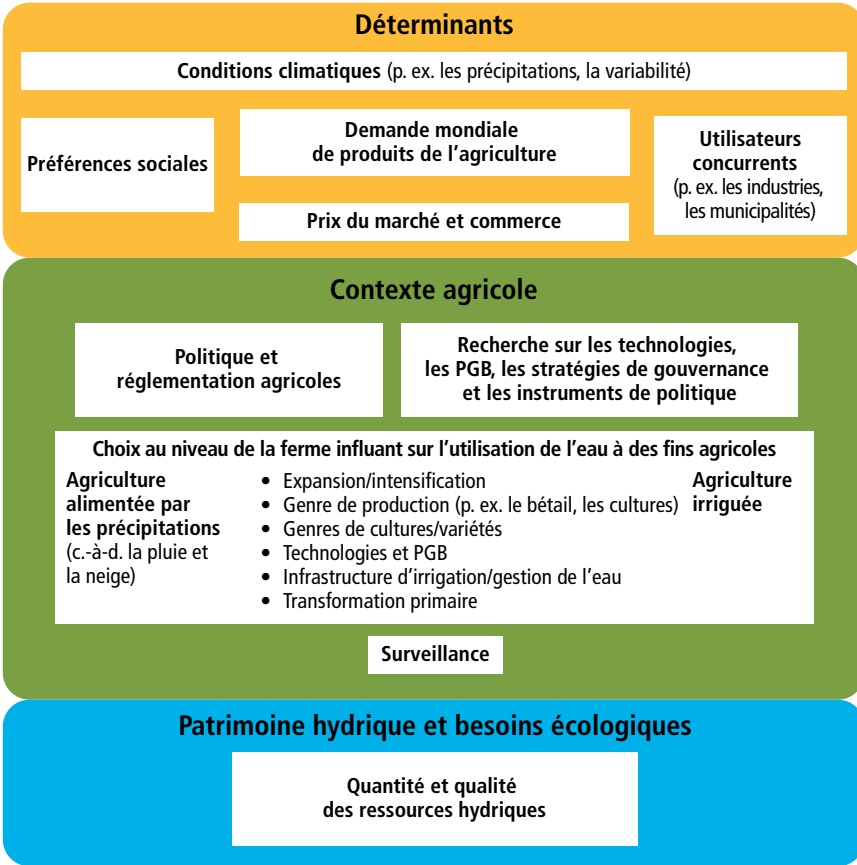


Figure 2.1

**Cadre conceptuel des déterminants nationaux et mondiaux de l'utilisation de l'eau à des fins agricoles**

Cette figure illustre le cadre conceptuel des déterminants et du contexte de l'utilisation de l'eau en agriculture. Il existe des liens complexes entre ces déterminants et les composantes du contexte agricole. Les déterminants et le contexte agricole influent sur la qualité des ressources hydriques en termes de quantité et de qualité.

terme de la production de biocarburants et l'opportunité de le faire demeurent très incertaines (Connor *et al.*, 2009). Parmi les autres produits agricoles non alimentaires qui laissent entrevoir un potentiel de croissance, il y a les produits biochimiques industriels et les produits pharmaceutiques (AAC, 2011a; Boehlje et Bröring, 2011).

À court et à moyen terme, la croissance démographique mondiale et la plus grande affluence dans les économies émergentes pourraient susciter une hausse continue et stable de la demande pour toutes les catégories de produits agricoles (de Fraiture *et al.*, 2007). Cette dynamique du marché devrait engendrer de nouveaux débouchés pour l'agriculture au Canada – un important secteur économique qui fait une contribution significative à la croissance économique, à la création d'emploi et au bien-être social dans les collectivités rurales (voir la section 2.2); cependant, il importe de s'attaquer à un certain nombre de défis importants si nous voulons que ce secteur saisisse efficacement les occasions appropriées.

### **Des défis à l'échelle mondiale : pressions croissantes sur les ressources et incertitudes accrues**

L'intensification de la concurrence pour les ressources, l'évolution des conditions du marché, les incertitudes au sujet des politiques des gouvernements et des entreprises, ainsi que le changement climatique figurent parmi les nombreux défis qui se posent à l'échelle mondiale et qui ont une incidence sur la gestion durable de l'eau en agriculture. Il y a de nombreux aspects où des données scientifiques supplémentaires pourraient être utiles afin de mieux comprendre et de surmonter ces défis.

### **Intensification de la concurrence pour les terres et l'eau**

L'un des défis les plus redoutables auxquels fait face l'agriculture dans le monde est l'intensification de la concurrence pour les ressources en terres et en eau (de Fraiture et Wichelns, 2010; Godfray *et al.*, 2010). Ce défi est présent dans de nombreux secteurs, alors que la population mondiale et les revenus augmentent, que le développement économique se poursuit et que les ressources deviennent plus rares par rapport à la demande. L'eau est une source de pression clé dans cette concurrence, notamment dans les régions du monde déjà exposées à un stress hydrique. Sous l'effet conjugué des pressions engendrées par la croissance démographique et le changement climatique, le stress hydrique devrait aussi aller en s'accroissant dans les prochaines décennies. Selon certaines estimations, jusqu'à six milliards de personnes pourraient vivre dans les régions exposées à un stress hydrique en 2050 (selon une revue des scénarios faite par Kundzewicz *et al.*, 2007).

La production agricole est étroitement liée à la disponibilité de l'eau. Cependant, la nature de la consommation d'eau en agriculture doit être envisagée dans un contexte approprié. Entre 71 et 80 % des terres cultivées dans le monde sont alimentées par les précipitations (ce qu'on appelle parfois les cultures sèches,

soit celles qui dépendent de la pluie et de la neige)<sup>8</sup>, tandis qu'entre 20 et 29 % seulement des terres sont alimentées par irrigation (de Fraiture et Wichelns, 2010; Molden *et al.*, 2007b). Ce dernier segment est important dans l'optique de la concurrence pour les ressources hydriques, car les prélèvements d'eau dans les nappes d'eaux souterraines, les lacs et les rivières à des fins d'irrigation (parfois appelée « eau bleue ») entrent habituellement en concurrence avec d'autres sources d'utilisation telles que l'industrie, la production d'énergie hydroélectrique et les municipalités. En outre, cette consommation d'eau bleue a généralement un impact beaucoup plus grand sur l'environnement local que l'agriculture non irriguée (eau verte) à cause de la façon dont l'irrigation peut aggraver le stress hydrique en haussant les niveaux de consommation d'eau et en modifiant les flux environnementaux (Molden *et al.*, 2007b). Néanmoins, tant l'agriculture non irriguée que l'agriculture irriguée ont un rôle clé à jouer en vue de répondre à la demande future de produits agricoles dans le monde (voir l'encadré 2.1).

### **Encadré 2.1**

#### **Contributions possibles de l'agriculture non irriguée et de l'agriculture irriguée à l'amélioration de la productivité et à la viabilité de l'agriculture**

Alors que la population continue de croître et que les effets du changement climatique se font sentir, l'agriculture irriguée et non irriguée peut contribuer à la productivité et à la durabilité. L'efficacité d'une pratique de gestion ou d'une technologie dépend de plusieurs facteurs, y compris le genre de cultures, les propriétés du sol et d'autres conditions locales.

La productivité de l'agriculture non irriguée peut être haussée par une utilisation plus efficace de l'eau, ce qui se traduit par des rendements accrus sans expansion de la superficie cultivée. Ainsi, le paillage ou le travail de conservation du sol peut à la fois réduire la quantité d'eau perdue inutilement par évaporation et diminuer le ruissellement en surface, ce qui augmente la quantité d'humidité disponible dans le sol pour les cultures (voir Rockström *et al.*, 2010).

L'agriculture irriguée occupe jusqu'à 29 % de la superficie cultivée dans le monde, mais elle pourrait représenter jusqu'à 38 % de la valeur brute de la production (de Fraiture et Wichelns, 2010). Plusieurs prévoient qu'avec la croissance de la population, le changement climatique et l'évolution des habitudes de consommation, l'agriculture

*suite à la page suivante*

8 Aux fins du présent rapport, le comité d'experts a opté pour l'expression « alimentée par les précipitations » qui reflète mieux le fait qu'une grande partie de l'agriculture au Canada est alimentée par la pluie et la neige.



irriguée jouera un rôle plus important dans la production alimentaire à l'échelle mondiale (Banque mondiale, 2010). Les avantages de l'agriculture irriguée sont simples : des rendements supérieurs pour les cultures et la protection contre la variabilité du climat, notamment les périodes de sécheresse. Le problème se situe au niveau des répercussions parfois sérieuses de l'irrigation sur l'environnement, lorsque de grands volumes d'eau sont détournés pour alimenter les cultures. L'utilisation accrue de l'irrigation contribue aussi à modifier les flux d'eau virtuelle dans le monde (Chapagain et Hoekstra, 2008) (voir l'encadré 2.2). Ainsi, dans les régions où l'eau est rare, les denrées agricoles produites pour l'exportation sur des terres irriguées peuvent représenter un déplacement d'eau de ces régions vers d'autres parties du monde, incluant le Canada. De plus, à mesure que la proportion de la production alimentaire mondiale qui dépend de l'irrigation augmente, les flux d'eau virtuelle se transforment et une plus grande partie de ces flux proviennent des sources d'eau de surface et souterraines, mais moins des précipitations et de l'humidité présente dans le sol. Pour atténuer ces préoccupations, il est possible d'accroître sensiblement l'efficacité de l'utilisation de l'eau sur les terres irriguées grâce à une meilleure gestion au niveau de la ferme et à l'entretien des systèmes d'irrigation, l'emploi de technologies de pointe telles que l'irrigation goutte-à-goutte et le recyclage de l'eau des systèmes de drainage. Les autres utilisations possibles de cette eau devraient aussi être prises en considération.

### **Encadré 2.2**

#### **La notion d'eau virtuelle**

L'eau virtuelle est définie comme étant « l'eau utilisée dans le processus de fabrication d'un produit industriel ou agricole » [traduction] (Hoekstra et Hung, 2002). Dans le cas de l'agriculture, cela comprend l'eau utilisée pour les cultures ou l'alimentation du bétail. La quantité d'eau virtuelle utilisée dans chaque cas dépend du mode et du lieu de fabrication. Ainsi, comme l'expliquent Hoekstra et Hung (2002), la production d'un kilogramme de céréales sur des terres alimentées par les précipitations dans une région où le climat est favorable à l'agriculture nécessitera entre 1 000 et 2 000 kg d'eau. Cependant, la production de la même quantité de céréales dans un pays où les conditions climatiques sont moins favorables, par exemple là où les températures sont élevées et les précipitations limitées, demandera entre 3 000 et 5 000 kg d'eau.

Bien que cette notion soit souvent utilisée pour conceptualiser les échanges d'eau virtuelle entre les régions ou les pays (Hoekstra et Hung, 2002; Konar *et al.*, 2011), le comité d'experts croit que le concept de l'eau virtuelle comporte certaines lacunes qui incitent à la prudence. Premièrement, il ne tient pas compte de l'eau qui aurait

*suite à la page suivante*

été utilisée pour maintenir le territoire dans son état naturel. Dans les Prairies, par exemple, il n'y a pas d'écart significatif dans la consommation d'eau entre les cultures céréalières sur des terres non irriguées et la croissance des plantes dans les pâturages naturels (Armstrong *et al.*, 2008). Deuxièmement, cette notion suppose que l'eau non utilisée dans les importations et les exportations virtuelles serait disponible pour d'autres usages. Cela n'est pas nécessairement le cas, parce que l'agriculture pourrait être la principale utilisation de recharge à la non-utilisation (notamment dans les régions moins peuplées) (Frontier Economics, 2008).

### L'évolution des conditions du marché

L'évolution des conditions du marché est une autre source d'incertitude. Même si la tendance à long terme de la demande mondiale de la plupart des produits agricoles sera à la hausse pour des décennies à venir, le prix du marché pourrait ne pas toujours refléter cette tendance à court et à moyen termes. Les crises alimentaires récentes ont montré que la principale préoccupation suscitée par les marchés agricoles mondiaux est la volatilité accrue des prix des aliments plutôt que les pénuries absolues. La volatilité des prix des aliments est causée par un ensemble complexe de facteurs, dont le déclin à long terme des stocks mondiaux d'aliments, les prix de l'énergie, les taux de change, les pressions sur les ressources, les mesures visant le commerce des produits agricoles comme les interdictions d'exporter, les chocs climatiques (les événements extrêmes et la variabilité du climat), ainsi que la forte spéculation sur les marchés à terme (Heady et Fan, 2008; OCDE-FAO, 2011)<sup>9</sup>. L'expérience des crises récentes a suscité des débats sur diverses mesures qui, si elles étaient appliquées, pourraient réduire la volatilité des prix des aliments à moyen terme. Certaines de ces mesures visent à accroître l'autosuffisance dans la production des denrées alimentaires de base au niveau national et régional (Banque mondiale, 2010). Si de telles stratégies

9 L'augmentation de la demande de biocarburants était l'un des nombreux facteurs à l'origine des sommets récents enregistrés dans les prix des aliments. Bien que les études réalisées par l'IFRI montrent que la crise alimentaire de 2007-2008 a été principalement causée par des facteurs systémiques à long terme, tels que la diminution des stocks, l'augmentation du prix de l'énergie et une résilience moindre aux chocs des prix, l'augmentation de la demande de biocarburants est ressortie comme un facteur clé qui pourrait influencer sur les prix des aliments dans l'avenir, à moins que des mesures ne soient prises pour prévenir un déplacement de la production d'aliments vers la production de biocarburants (Heady et Fan, 2008). Des exercices de modélisation montrent aussi que les nouvelles politiques axées sur les biocarburants qui comportent des critères de production durable pourraient aussi engendrer des effets de substitution importants dans l'utilisation des terres (Laborde, 2011). Ces effets de substitution ont eux-mêmes des répercussions importantes sur l'utilisation de l'eau (Harto *et al.*, 2010; Hoogeveen *et al.*, 2009) et les émissions de gaz à effet de serre (Searchinger *et al.*, 2008).

sont couronnées de succès, les échanges internationaux de produits agricoles et les possibilités concomitantes d'expansion des marchés d'exportation pourraient croître plus rapidement que la demande globale, avec une certaine réduction des possibilités du côté des stratégies de production axées sur l'exportation.

À court terme, la volatilité des prix crée des risques financiers pour les agriculteurs. Bien que ces derniers puissent bénéficier de prix plus élevés au cours de certaines années, ces gains sont probablement annulés lorsque les prix s'effondrent au cours d'autres années. L'incertitude qui plane sur les revenus complique la planification financière et peut limiter la mesure dans laquelle les agriculteurs sont prêts à investir ou à choisir des cultures moins exposées à la volatilité. Cela pourrait signifier que des occasions de marché ne seront pas exploitées. Les fluctuations de prix font partie de la réalité quotidienne de l'agriculture. Bien que diverses politiques et divers mécanismes financiers tels que les facilités de crédit à court terme<sup>10</sup>, l'assurance-récolte ou les mesures visant à atténuer l'impact des fluctuations de prix mondiaux aient été mis en place pour aider les agriculteurs à faire face aux fluctuations de prix « normales » (Gilbert et Morgan, 2010), les tendances récentes de la volatilité des prix des aliments se situent hors de l'intervalle prévisible de ces instruments. Cela pourrait nuire à la stabilité financière des agriculteurs et des transformateurs de produits alimentaires à moyen terme. Cela soulève une préoccupation particulière parce que les investissements dans l'infrastructure de gestion de l'eau et l'irrigation ont habituellement un long horizon et requièrent une certaine stabilité aux fins de la planification financière.

### **Incertitudes au niveau des politiques des gouvernements et des entreprises**

Un autre facteur lié aux conditions du marché international est l'adoption de politiques dans d'autres pays susceptibles d'influer sur le commerce des produits agricoles ou même d'engendrer des distorsions sur ce marché. De telles mesures ont globalement pour effet de ralentir ou d'entraver la transmission des signaux internationaux aux producteurs nationaux. Cela se répercute sur les décisions d'investissement visant à exploiter de nouveaux débouchés sur les marchés étrangers. En dépit des efforts de libéralisation du commerce international, les échanges de produits agricoles demeurent assujettis à des restrictions dans de nombreux pays, c'est-à-dire à des mesures telles que des droits tarifaires ou des contingents à l'importation (Gifford *et al.*, 2008a, 2008b). De plus, le commerce international des produits agricoles est globalement réglementé par des normes internationales portant sur la santé des plantes et des animaux et la sécurité

---

10 Agri-stabilité, Agri-investissement et Agri-protection sont les volets de la série de programmes de gestion des risques de l'entreprise de Cultivons l'avenir.

alimentaire, notamment les normes sanitaires et phytosanitaires recommandées par l'Organisation mondiale du commerce (OMC). Outre ces normes, les pays peuvent imposer individuellement d'autres restrictions à l'importation de produits agricoles. Ainsi, certains pays peuvent souhaiter restreindre les importations et les exportations d'aliments pour renforcer la sécurité alimentaire sur leur marché intérieur alors que la demande alimentaire mondiale augmente (Anderson, 2010a; Godfray *et al.*, 2010). D'autres incertitudes peuvent aussi découler des changements requis par les « indices de durabilité » et d'autres normes imposées aux agriculteurs par un nombre croissant d'entreprises multinationales du secteur de l'alimentation (voir l'encadré 2.3).

### **Encadré 2.3**

#### **Conséquences des indices de durabilité pour les chaînes d'approvisionnement agricoles**

Le marché à la consommation peut avoir une incidence significative sur les pratiques de gestion de l'eau agricole parce que les entreprises peuvent imposer des exigences aux agriculteurs dont ils achètent les produits. Il existe des milliers de régimes/normes d'accréditation et d'initiatives volontaires de durabilité dans le monde. À des degrés divers, elles comportent des indicateurs environnementaux, sociaux et économiques, notamment pour la conservation de l'eau (Potts *et al.*, 2010).

Plusieurs grandes entreprises ont adopté des indices de durabilité comme stratégie de commercialisation afin de donner à leur marque une reconnaissance liée à des objectifs environnementaux. Ainsi, des détaillants comme Walmart et Nestlé ont élaboré des critères de durabilité internes qu'ils appliquent à la sélection des fournisseurs (Nestlé, 2010; Walmart, 2010). L'accréditation par des tiers est également employée pour faire reconnaître une marque en tant que produit « durable ». À titre d'exemple, la Rainforest Alliance offre à plusieurs détaillants canadiens une accréditation pour des produits tels que le café, le thé et le cacao (Rainforest Alliance, 2012). Des programmes interentreprises axés sur la durabilité qui ne sont pas connus des consommateurs sont aussi utilisés par des sociétés telles que Loblaw's et McCain. Ces initiatives visent à garantir la sécurité des aliments, l'accréditation étant décernée à des entités indépendantes comme CanadaGAP et PrimusLabs.

Les indices employés tant sur le marché de détail qu'entre les entreprises comportent souvent une série de règles ou de critères pour déterminer la mesure dans laquelle les conditions respectent les exigences de durabilité (Genier *et al.*, 2008). Bien que la mise en place de mesures de durabilité soit une initiative volontaire de l'organisation acheteuse (p. ex. Walmart, Loblaw's), celles-ci sont obligatoires pour les producteurs.

*suite à la page suivante*

Dans la plupart des programmes courants, si un agriculteur ne respecte pas les conditions établies, ses produits ne seront pas achetés (Genier *et al.*, 2008). Étant donné qu'il existe plusieurs indices comportant des exigences variées, le processus peut s'avérer difficile et complexe pour les agriculteurs qui doivent se conformer à différentes séries de mesures. En outre, les indices sont souvent élaborés sans tenir compte des circonstances locales, et un producteur pourra ne pas être accepté pour des motifs qui n'ont aucune pertinence (Genier *et al.*, 2008).

Le comité d'experts est d'avis que les producteurs devraient être assujettis à des normes cohérentes, raisonnables et scientifiquement fondées. Ces programmes ou ces normes devraient être analysés en fonction d'un langage commun permettant de comparer leurs objectifs et leur efficacité (Potts *et al.*, 2010). Un exemple à cet égard est le travail entrepris dans le cadre du State of Sustainability Initiatives Project, coordonné par divers organismes internationaux dont l'Institut international du développement durable et la CNUCED (Potts *et al.*, 2010).

Les règlements portant sur les produits dérivés d'organismes génétiquement modifiés (OGM) ont aussi une importance particulière. Les perceptions au sujet des risques liés aux OGM et aux produits dérivés varient considérablement d'un pays à l'autre. Plusieurs pays qui représentent d'importants marchés d'exportation ont entrepris de réviser leurs politiques en ce qui a trait aux restrictions à l'importation et aux exigences applicables aux produits renfermant des OGM. Ces initiatives sont pertinentes à la demande d'eau future dans le secteur agricole parce que les modifications génétiques pourraient devenir un instrument clé pour manipuler la demande d'eau associée aux variétés de cultures. Alors que la première vague de modifications génétiques s'inscrivait dans des stratégies visant à accroître les rendements et la résistance aux parasites nuisibles et aux pathogènes, les stratégies futures porteront de plus en plus sur l'adaptabilité accrue des cultures à diverses conditions climatiques en augmentant leur tolérance à la chaleur, au froid et au stress hydrique. Les restrictions à l'importation de produits liés à des OGM pourraient avoir une incidence sur le portefeuille de technologies disponibles pour concevoir des stratégies de production agricole axées sur l'exportation, y compris les options technologiques qui influent sur l'utilisation de l'eau (Anderson et Jackson, 2012; Hewitt, 2010; Tangermann, 2010; Valetta, 2010).

### **Incertitudes suscitées par le changement climatique**

L'évolution du climat posera vraisemblablement des défis croissants pour l'agriculture en raison des changements dans les variables climatiques (p. ex. la température, les précipitations et les concentrations de CO<sub>2</sub>), de la fréquence accrue d'événements

extrêmes (p. ex. les crues, les sécheresses et les vagues de chaleur) et d'autres effets indirects (p. ex. la propagation des parasites nuisibles et des maladies). La façon et la mesure dans laquelle ces événements se répercuteront sur l'agriculture et l'eau varieront d'un endroit à l'autre. Bien que les scénarios climatiques futurs comportent toujours une incertitude considérable, notamment pour ce qui est des précipitations à l'échelle locale et régionale (Kundzewicz *et al.*, 2007), il est aujourd'hui largement admis dans la communauté scientifique qu'un univers plus chaud accélérera le cycle hydrologique et fera augmenter le niveau moyen des précipitations sur la planète. Cependant, certaines grandes régions agricoles du monde peuvent s'attendre à recevoir moins de précipitations (GIEC, 2007; FAO, 2008). À titre d'exemple, les secteurs déjà relativement secs des Prairies canadiennes, pourraient devenir encore plus arides à mesure que la température s'élèvera (Kulshreshtha, 2011). Simultanément, la variabilité climatique et les événements extrêmes devraient s'intensifier (Kulshreshtha, 2011). Les précipitations dans les Prairies canadiennes montrent déjà des signes d'évolution, notamment des pluies plus abondantes et des chutes de neige plus limitées au printemps et à l'automne, ainsi qu'une hausse de l'intensité et de la durée des épisodes de pluie qui s'étendent sur plusieurs jours (Shook et Pomeroy, 2012).

Quelle que soit sa nature, le changement climatique compliquera vraisemblablement les efforts faits pour accroître les rendements agricoles tout en améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la protection des écosystèmes naturels (Banque mondiale, 2010). La fréquence accrue des inondations et des périodes de sécheresse soulève une préoccupation particulière en raison des graves effets de ces phénomènes sur l'agriculture, comme en témoigne la vague de chaleur intense en Russie et les inondations concomitantes au Pakistan en 2010 (voir, par exemple, Coumou et Rahmstorf, 2012), ainsi que la sécheresse aux États-Unis en 2012 (NOAA, 2012a). De plus, l'évolution et la variation des conditions climatiques peuvent contribuer à des mouvements importants dans l'offre de certains produits à court et à long termes, provoquant des variations dans les prix pouvant avoir une incidence positive ou négative pour les producteurs agricoles. À vrai dire, les agriculteurs font face depuis longtemps à ce genre de problème; cependant, le changement climatique aura tendance à accentuer cette incertitude (Kurukulasuriya et Rosenthal, 2003; Warren et Egginton, 2008).

## **2.2 LE CONTEXTE CANADIEN : L'EAU, LE CLIMAT ET LES DIMENSIONS ÉCONOMIQUE ET SOCIALE**

### **L'importance de l'agriculture pour le Canada**

L'agriculture est un secteur important de l'économie et de la société canadiennes (voir l'encadré 2.4), et elle fait une contribution importante au PIB, aux exportations, à l'emploi, à la sécurité alimentaire et à la vitalité des collectivités rurales. En 2010,

la production agricole primaire a engendré des revenus bruts de 51,1 milliards de dollars. L'agriculture est également un volet clé du vaste système agroalimentaire, étant à l'origine de près de 2 millions d'emplois (AAC, 2011c; Conference Board du Canada, 2011). En outre, quelque 70 % des aliments achetés au Canada proviennent de producteurs agricoles canadiens (cité dans TRNEE, 2010a).

### **Encadré 2.4**

#### **Profil de l'agriculture au Canada**

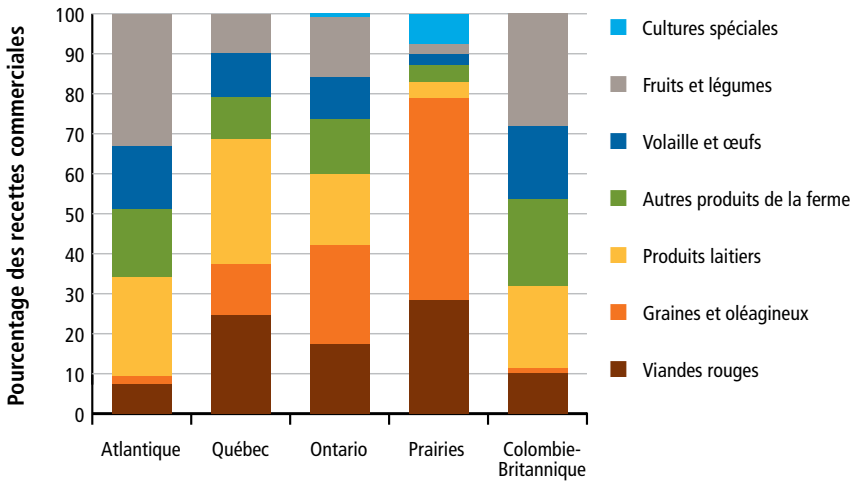
Voici un tableau sommaire du secteur agricole canadien selon des chiffres tirés du plus récent recensement de l'agriculture (2011) :

- 205 730 exploitations agricoles, en baisse de 10,3 % depuis 2006;
- une superficie agricole totale de 160,2 millions d'acres, en baisse de 4,1 % depuis 2006;
- 87,4 millions d'acres de terres en culture, une baisse de 1,6 % depuis 2006;
- les exploitations agricoles encaissant des revenus agricoles bruts de 500 000 dollars et plus représentaient 11,5 % du nombre total d'exploitations et 67,9 % du total des revenus agricoles bruts en 2011, contre 8,6 % du nombre total d'exploitations et 60,1 % du total des revenus agricoles bruts en 2006;
- 293 925 producteurs agricoles dont 27,4 % sont des femmes;
- 48,3 % des exploitants sont âgés de 55 ans ou plus, la moyenne se situant à 54 ans;
- 3 713 exploitations organiques accréditées en 2011, contre 3 555 en 2006.

(Statistique Canada, 2012)

Bien que le secteur agroalimentaire occupe une place importante dans toutes les régions, il représente une part plus élevée de l'économie de certaines provinces (AAC, 2011c). La contribution moyenne au PIB provincial est d'environ 3,25 %, la part la plus élevée étant enregistrée en Saskatchewan (12,8 %), tandis que la plus modeste est observée en Colombie-Britannique (environ 1,8 %) <sup>11</sup>. Comme le montre la figure 2.2, il y a des différences importantes entre les régions au niveau de la production. Ainsi, les céréales et les oléagineux occupent une place importante dans l'économie agricole des Prairies, alors que l'industrie laitière est relativement importante au Québec et que les fruits et légumes sont importants en Colombie-Britannique. Tel que souligné à divers endroits dans le présent rapport, ces différences régionales au niveau de la production créent des besoins

11 Fondé sur des données de 2011 fournies par AAC.



Source des données : AAC, 2012

Figure 2.2

### Part des recettes commerciales des régions par catégorie de produit, 2012

Cette figure illustre les écarts dans la part des recettes commerciales par catégorie de produit parmi les producteurs agricoles des différentes régions du Canada.

différents sur le plan de la consommation et de la gestion de l'eau et elles ont des conséquences significatives pour ce qui est des pratiques de gestion durable les plus appropriées dans chaque contexte régional.

### Les ressources hydriques du Canada

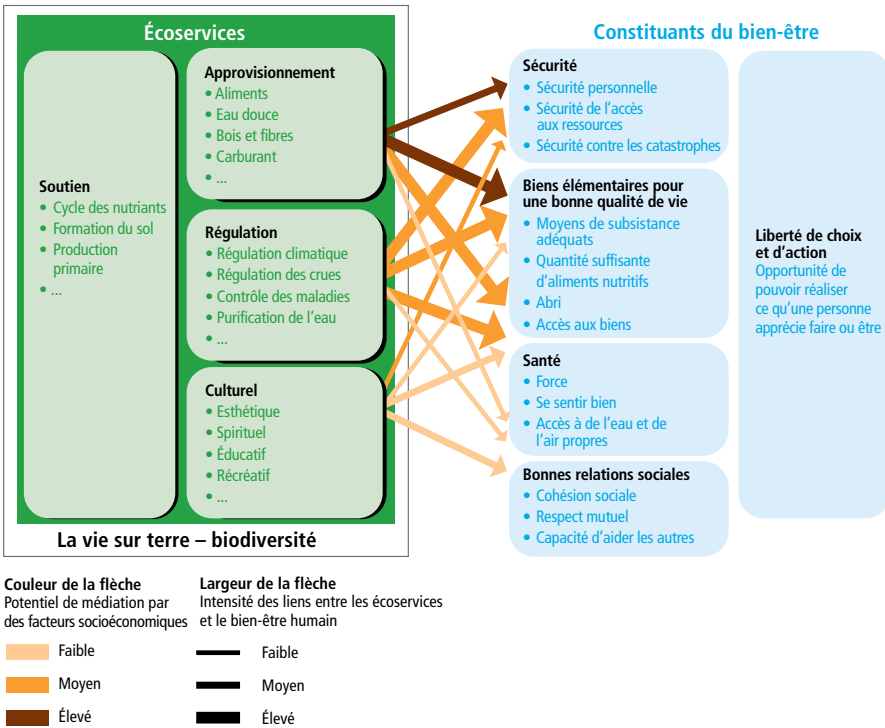
L'eau et les écosystèmes qu'elle soutient sont parmi les ressources les plus précieuses du Canada. L'eau est essentielle à toutes les formes de vie et, sous une forme ou une autre, elle est utilisée dans tous les secteurs de l'économie. Il n'est donc pas étonnant que les Canadiens reconnaissent généralement l'importance de l'eau. Dans une enquête réalisée en 2011 par Ipsos Reid auprès de plus de 2 000 Canadiens, 55 % des répondants ont indiqué que l'eau était la ressource naturelle la plus précieuse du pays (comparativement à 15 % qui ont mentionné les terres agricoles, 13 % les forêts, 12 % le pétrole et 4 % une autre ressource) (Ipsos Reid, 2011)<sup>12</sup>. Dans la même enquête, 41 % des répondants ont affirmé être « très préoccupés » au sujet de l'approvisionnement en eau et de la qualité de l'eau douce au Canada à long terme, une autre tranche de 39 % affirmant être « quelque peu préoccupés » (Ipsos Reid, 2011).

<sup>12</sup> Les chiffres ne totalisent pas 100 parce que certaines données ont été arrondies.



Les Canadiens ont de bonnes raisons de se préoccuper de l'offre et de la qualité de leurs ressources en eau douce. Les sécheresses et les pénuries d'eau posent un défi chronique et les problèmes liés à la qualité de l'eau et à la détérioration des écosystèmes sont répandus. En outre, près de 70 % de l'eau douce du pays s'écoule vers le nord alors que la majorité de la population est établie dans la partie sud du pays (Corkal et Adkins, 2008; Statistique Canada, 2010a). Les ressources hydriques disponibles sont par ailleurs réparties de façon inégale au pays et, à certains endroits, elles donnent lieu à une concurrence croissante. Ainsi, en comparant l'utilisation de l'eau aux écoulements fluviaux disponibles, nous constatons que les ressources en eau dans certaines régions comme le Sud-Ouest du Québec, le Sud de l'Ontario et certaines parties de l'Intérieur de la Colombie-Britannique et des Prairies sont déjà soumises à des pressions (TRNEE, 2010a).

Les débits des cours d'eau et les niveaux des nappes d'eaux souterraines soutiennent les écosystèmes et les populations humaines. Dans l'optique des écosystèmes aquatiques, une préoccupation particulière a trait aux *flux environnementaux*, définis par la Banque mondiale comme étant la qualité, la quantité et la durée des écoulements d'eau requis pour maintenir les éléments, les fonctions, les processus et la résilience des écosystèmes aquatiques qui procurent des biens et services aux gens (Hirji et Davis, 2009). De façon plus générale, les systèmes d'eaux de surface et d'eaux souterraines fournissent ce qu'il est convenu d'appeler des services écosystémiques (ou écoservices), qui comprennent – mais sans s'y limiter – l'eau destinée aux personnes et aux animaux, le soutien des écosystèmes aquatiques et terrestres, la protection contre les crues, les voies de navigation, et la dilution et l'élimination des déchets (voir la figure 2.3). Les gens utilisent ces services écosystémiques pour produire la richesse économique, la santé et le bien-être; ce faisant, ils peuvent aussi nuire à la salubrité des écosystèmes (comme lorsqu'il y a surutilisation, détournement ou pollution de la ressource) et à la capacité de ces écosystèmes de produire ces avantages (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Le défi est de faire en sorte que l'eau soit valorisée et conservée d'une façon qui reflète sa pleine valeur économique, environnementale et sociale. Souvent, la valeur n'est exprimée qu'en fonction de ce que les écosystèmes peuvent produire; ce qui est nécessaire pour les soutenir n'est pas pris en considération (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Ces questions sont examinées plus en détail au chapitre 6.



Adapté de Millennium Ecosystem Assessment, 2005

Figure 2.3

**Liens entre les écoservices et le bien-être humain**

Cette figure montre les liens entre les écoservices et les constituants du bien-être humain, en illustrant comment les écoservices fournis par l'environnement sont liés intrinsèquement au bien-être humain.

**Importance de l'eau pour l'agriculture canadienne**

Globalement, les activités agricoles représentent environ 10 % des prélèvements bruts d'eau au Canada, ce qui est bien inférieur à l'utilisation des centrales thermiques de production d'électricité et à l'utilisation domestique des municipalités et des collectivités rurales (TRNEE, 2010a). Néanmoins, l'agriculture est le plus grand consommateur d'eau au Canada, représentant 66 % de l'eau consommée au niveau national, bien qu'il y ait des variations importantes entre les régions (TRNEE, 2010a).

L'accès à des volumes suffisants d'eau douce est essentiel pour la production agricole. Dans le cas de l'agriculture non irriguée, les précipitations sont l'une des contraintes aux cultures et à l'élevage. En grande majorité, les cultures au

Canada dépendent des précipitations, ce qui représentait 97,6 % de la superficie cultivée en 2006 (AAC, 2011c). Dans certaines régions du pays, l'irrigation est utilisée pour compenser les déficits dans les quantités de précipitations disponibles, accroître la productivité et, parfois, améliorer la qualité des produits. La prévalence de l'irrigation varie beaucoup au Canada. C'est en Colombie-Britannique que la proportion des terres cultivées à l'aide de l'irrigation est la plus élevée, soit 20 %. L'Alberta est la province qui a la plus grande superficie irriguée, soit 64 % de l'ensemble des terres irriguées du pays (AAC, 2011c). Tel qu'indiqué au chapitre 3, la concurrence entre l'agriculture et les autres formes d'utilisation de l'eau pourrait constituer un facteur limitatif pour l'expansion de la production agricole.

L'agriculture peut aussi avoir d'autres répercussions sur l'environnement et le bien-être humain. Celles-ci peuvent être positives ou négatives, selon les conditions locales, les technologies employées et les pratiques de gestion adoptées (Power, 2010). Ainsi, une exploitation agricole bien gérée cherchera à limiter les répercussions négatives sur l'eau ou d'autres aspects de l'environnement et pourrait offrir certains avantages pour une gamme de services écosystémiques (Power, 2010). Toutefois, l'agriculture peut avoir un impact négatif sur les écosystèmes aquatiques en raison des changements dans l'utilisation du territoire (p. ex. la perte d'habitats naturels à cause de la conversion de terres humides en terres cultivées), de l'utilisation de l'eau, de la pollution et de l'érosion. Les sources de contamination comprennent les pesticides et les nutriments (dont l'azote et le phosphore) provenant du ruissellement des engrais, et les agents pathogènes en suspension et les substances nocives pour le système endocrinien qui proviennent des déchets animaux (Corkal et Adkins, 2008). Ces contaminants peuvent nuire à la fois à la qualité de l'eau potable et à la santé des écosystèmes. En outre, une eau de mauvaise qualité peut nuire à la productivité agricole, menacer la santé des animaux et réduire l'efficacité des pesticides et l'efficacité des opérations de nettoyage (Corkal et Adkins, 2008). Tel qu'indiqué plus loin dans l'encadré 2.5, ce ne sont là que quelques exemples des interactions entre l'utilisation des terres et la gestion de l'eau. Les problèmes et les possibilités liés à l'utilisation des terres et à la gestion de l'eau dans les territoires agricoles sont examinés tout au long du présent rapport, notamment les défis posés par les utilisations concurrentes (chapitre 3) et les changements dans l'utilisation des terres (chapitre 4), de même que les possibilités offertes par l'agriculture de conservation et les PGB (chapitre 4), les innovations technologiques (chapitre 5) et les stratégies de gouvernance (chapitre 6).

### **Encadré 2.5**

#### **Le lien entre l'utilisation des terres et la gestion de l'eau**

L'utilisation des terres et la gestion de l'eau sont intimement liées. Les activités humaines ont profondément transformé le territoire sur lequel nous vivons et les changements survenus dans l'utilisation et l'aménagement des terres influent sur les processus hydrologiques qui déterminent les risques d'inondation, les ressources hydriques disponibles (pour répondre aux besoins humains et environnementaux), ainsi que le transport et la dilution des polluants (Wheater et Evans, 2009). À un niveau fondamental, les processus hydrologiques qui déterminent le débit et le moment du ruissellement de surface et l'alimentation de la nappe d'eau souterraine, ainsi que la qualité de l'eau, dépendent de la composition de la surface du sol. Un exemple simple est le développement urbain. Le remplacement d'un sol perméable par des revêtements tels que les toitures ou une surface pavée réduit la capacité de stockage de l'eau dans le sol associée au cycle hydrologique et augmente l'écoulement en surface, ce qui peut accroître les débits de pointe de crues des rivières et réduire l'étiage. Les changements qui surviennent dans la gestion des terres agricoles sont de nature plus complexe; à titre d'exemple, le type de culture influera sur l'évaporation, tandis que les méthodes de travail du sol pourront influencer sur l'accumulation de neige et les processus de ruissellement. L'affectation des terres à des fins résidentielles, industrielles ou agricoles a aussi un impact direct sur la quantité d'eau qui sera prélevée et consommée, de même que sur la quantité et la qualité de l'eau qui sera retournée dans les cours d'eau et les nappes d'eaux souterraines. Pour ces diverses raisons, l'utilisation des terres et la gestion de l'eau doivent être examinées ensemble.

Le Canada a la chance d'avoir accès à des ressources hydriques qui peuvent soutenir un secteur agricole robuste. Cependant, l'accès continu à des quantités d'eau de qualité adéquate ne saurait être tenu pour acquis. La viabilité du secteur agricole et sa capacité d'exploiter les débouchés actuels et émergents sur le marché mondial dépendront de sa résilience et de la capacité d'adaptation que les agriculteurs canadiens ont acquise et démontrée au fil des générations, et de la mesure dans laquelle les systèmes de gestion et de gouvernance de l'eau auront été renforcés. Cela est notamment important à la lumière des perceptions changeantes du public envers l'agriculture (voir l'encadré 2.6) et de son « permis d'exploitation social ».

### **Changement climatique**

Même dans des conditions normales, le climat canadien fait voir d'importantes variations géographiques, saisonnières et interannuelles. Par conséquent, on ne peut employer de données climatiques hautement agrégées, par exemple au niveau

### **Encadré 2.6** **Perceptions de l'agriculture**

Les attitudes des Canadiens à l'égard de l'agriculture et des enjeux du secteur agricole n'ont pas fait l'objet de beaucoup de recherches. De même, il y a peu de données disponibles sur l'opinion qu'ont les agriculteurs du cadre de politiques et des problèmes émergents auxquels doit faire face l'industrie. Néanmoins, des sondages récents font ressortir certaines grandes tendances nationales. Un sondage en ligne mené en 2010 sur les opinions des Canadiens à l'égard de l'agriculture au Canada, commandité par l'Ontario Farm Animal Council (OFAC), nous fournit un exemple. Ce sondage Ipsos-Reid a révélé que 57 % des répondants avaient une opinion positive de l'agriculture au Canada (OFAC, 2010). Les résultats montrent que les agriculteurs ont un niveau élevé de crédibilité auprès du public sur les questions d'alimentation et d'agriculture, arrivant au second rang après les vétérinaires (OFAC, 2010). En outre, dans une enquête menée par Financement agricole Canada en 2011, 82 % des consommateurs canadiens ont affirmé que l'industrie agricole fournissait des aliments salubres et sains à la population de manière efficace (Financement agricole Canada, 2011). Cependant, d'autres enquêtes ont montré qu'une tranche de la population considère l'agriculture comme une importante source de pollution (Jones, 2006). Comme l'a souligné Sadler Richards (2003), l'époque où l'agriculture était considérée comme un mode de vie idyllique, avec des effets bénins sur l'environnement, est révolue. Cela donne lieu à une sérieuse dichotomie entre l'opinion positive qu'a la société de l'agriculture, et la vision de l'agriculture en tant qu'importante source de pollution.

national, pour étudier l'agriculture. Les méthodes agricoles, l'infrastructure, les systèmes de production et les cultures sont généralement adaptées aux conditions climatiques moyennes d'une région. Les changements par rapport à un état climatique donné engendreront des pressions en vue d'adapter les méthodes actuelles pour maintenir la productivité (Gornall *et al.*, 2010).

L'histoire récente nous donne une certaine idée de ce que le changement climatique pourrait réserver au Canada. Le changement climatique a déjà entraîné une hausse de la température moyenne au Canada et il est probable qu'il influera sur les profils de précipitations au niveau local (Zhang *et al.*, 2011). Sur un horizon de plusieurs décennies, on constate qu'il y a eu un changement dans les niveaux globaux d'humidité. Ainsi, Mekis et Vincent (2011) ont montré qu'il y avait eu une augmentation générale des précipitations au cours des dernières décennies dans certaines régions du pays. Par contre, une mesure de la disponibilité de l'eau de surface (qui tient compte de la température et de l'évaporation), appelée PDSI (indice

de sévérité de sécheresse de Palmer), indique une tendance générale à l'assèchement dans la plus grande partie du pays (Dai *et al.*, 2004). Les températures plus élevées ont entraîné une évaporation accrue et, partant, des surfaces plus sèches, ce qui va à l'encontre de l'augmentation des précipitations. De plus, la diminution du couvert neigeux attribuable au remplacement de chutes de neige par des chutes de pluie sur une bonne partie du pays a eu des conséquences importantes pour les méthodes de gestion de la neige sur les terres agricoles, notamment dans les Prairies (Shook et Pomeroy, 2011, 2012) et le ruissellement à petite échelle qui fournit l'eau nécessaire à l'alimentation du bétail (Pomeroy *et al.*, 2012). En outre, la baisse de l'accumulation de neige dans les Rocheuses (Brown et Mote, 2009; Mote *et al.*, 2005) a eu de profondes répercussions sur l'approvisionnement en eau aux fins d'irrigation et l'efficacité continue des structures et des systèmes de gestion de l'eau dans les Prairies (voir, par exemple, Centre for Hydrology, 2012).

Le changement climatique devrait avoir de profonds effets sur la disponibilité de l'eau à des fins agricoles dans la plus grande partie sinon la totalité du pays, mais ceux-ci varieront selon les conditions climatiques, géographiques et agricoles locales en réponse à un certain nombre de facteurs interdépendants. On peut distinguer trois types d'effets sur la disponibilité de l'eau : a) les effets attribuables au changement climatique local, b) les effets attribuables au changement climatique éloigné et c) les effets attribuables à une plus grande variabilité climatique.

**Les effets attribuables au changement climatique local** sont principalement liés à l'augmentation des températures et aux changements dans les profils de précipitations. L'un des effets les plus marqués a trait au stockage de l'eau dans le sol et les plans d'eau de surface. Les changements dans les profils de précipitations sont le principal déterminant local du changement dans la disponibilité de l'eau, mais ils sont aussi les plus difficiles à prédire en raison de l'interdépendance de ces facteurs avec les changements qui surviennent dans la circulation atmosphérique et les conditions locales, dont le niveau d'humidité dans le sol. Les modèles actuels ne peuvent systématiquement tenir compte de tous ces éléments interdépendants (Schiermeier, 2010). La diminution des chutes de neige et le ruissellement plus hâtif provenant de la fonte des neiges influenceront aussi sur le taux d'humidité dans le sol, ce qui pourrait réduire l'efficacité de l'utilisation de l'eau si le ruissellement se produit à des périodes qui ne concordent pas avec la gestion de l'eau à des fins agricoles (Gornall *et al.*, 2010). Du même coup, les hausses de température se traduiront par une plus grande utilisation d'eau en raison de l'évapotranspiration, à moins que la région ne soit déjà affectée par un manque d'humidité dans le sol causé par la sécheresse (Gornall *et al.*, 2010; Miller *et al.*, 2000). Les effets indirects englobent une augmentation de la quantité d'eau utilisée par suite de l'intensification ou de l'expansion de la production agricole, à mesure que les

températures plus élevées permettent de pratiquer des types de cultures différents, ce qui se traduit par une extension de la saison de culture, de la zone irriguée et de la frontière nord de l'agriculture (Gornall *et al.*, 2010; Olesen *et al.*, 2007).

**Les effets attribuables au changement climatique éloigné** concernent davantage l'agriculture irriguée, en fonction des cours d'eau qui sont alimentés par la fonte des neiges dans les régions montagneuses situées en amont. La diminution du débit de pointe et du débit printanier-estival, ainsi que le déplacement du moment où survient le débit de pointe en raison de la fonte des neiges plus hâtive au printemps influenceront sur la disponibilité de l'eau pour les utilisations en aval (GIEC, 2007; Stewart *et al.*, 2005). La baisse des niveaux d'eau dans les bassins fluviaux alimentés par la fonte des neiges pourrait avoir des conséquences encore plus profondes sur l'agriculture irriguée (Mote *et al.*, 2005; RNCan, 2004; Stewart *et al.*, 2005).

**Les effets attribuables à une plus grande variabilité climatique** seront observés par le biais de divers événements météorologiques extrêmes pouvant avoir une incidence sur l'agriculture (RNCan, 2004). Ces événements englobent les fortes précipitations, la grêle, le vent et le gel, ainsi que le moment auquel ces événements se produisent. Les fortes précipitations ou les périodes d'humidité prolongées peuvent provoquer des inondations. On se préoccupe aussi de la possibilité que le changement climatique entraîne des sécheresses catastrophiques dans les Prairies (Bonsal *et al.*, 2012). Les températures plus chaudes associées au changement climatique accéléreront vraisemblablement les processus d'évaporation et augmenteront l'assèchement de la surface (voir, par exemple, Dai, 2011). Certains scénarios indiquent que les Prairies pourraient connaître des périodes de sécheresse plus tard au cours de ce siècle qui seront plus graves que les sécheresses survenues au 20<sup>e</sup> siècle (Bonsal *et al.*, 2012). La sécheresse a habituellement un impact dramatique sur l'agriculture (Wheaton *et al.*, 2008). Les pires catastrophes à survenir au Canada sont souvent liées à la sécheresse, surtout dans les Prairies, causant principalement des pertes dans le secteur agricole (Bonsal *et al.*, 2011).

Il est actuellement difficile de faire des prévisions sur la disponibilité de l'eau, mais le changement climatique pose des défis encore plus redoutables pour ce qui est de notre capacité de faire des prévisions exactes sur les conditions climatiques au Canada dans l'avenir. Le changement climatique aura probablement des répercussions étendues et les scénarios demeurent incertains. Voici certains des facteurs qui compliquent la prévision des effets du changement climatique sur les ressources hydriques :

- La variabilité élevée des paramètres climatiques (telles que les précipitations), pour ce qui est tant de l'endroit que de la période de l'année (caractéristique inhérente au système climatique canadien), signifie qu'il est difficile de toujours cerner les tendances à long terme des profils de précipitations au niveau local ou régional. En outre, dans un monde aux prises avec un réchauffement, il faut s'attendre à une augmentation des niveaux extrêmes des précipitations (humidité autant que sécheresse). Ainsi, les tendances observées dans le volume de précipitations pourraient dissimuler des changements plus subtils déjà amorcés.
- Les événements climatiques extrêmes sont souvent le produit d'interactions complexes avec les systèmes de circulation atmosphérique planétaires et des cycles à long terme qui sont encore mal compris, ce qui rend difficile de prévoir leur évolution probable (Mladjic *et al.*, 2011; Roy *et al.*, 2011).
- Les modèles actuels ne tiennent pas compte adéquatement des interactions critiques entre la surface de la terre et l'atmosphère (Barrow *et al.*, 2004). Plusieurs événements liés aux précipitations sont alimentés en partie par les conditions d'humidité en surface, lesquelles dépendent des précipitations. Cet effet de rétroaction doit être intégré de façon appropriée aux modèles et outils employés pour prévoir les tendances des précipitations au niveau local ou régional.
- Dans une veine similaire, il importe de mieux comprendre les processus de formation des tempêtes à grande échelle. Szeto *et al.* (2011) ont récemment démontré qu'une pluie torrentielle survenue dans le Sud des Prairies en juin 2002 avait été aggravée par les conditions de sécheresse qui prévalaient alors. Les modèles actuels n'ont pas la résolution spatiale nécessaire pour intégrer les processus internes de formation des tempêtes et de rétroaction qui sont à l'origine de ces événements catastrophiques et qui ont des effets marqués sur l'agriculture et la disponibilité de l'eau.
- La prévision des sécheresses, comme des autres événements extrêmes, est aussi rendue difficile par les limites des outils de modélisation et de surveillance. Bonsal *et al.* (2011) insistent sur le besoin de disposer de meilleures méthodes de réduction d'échelle pour appliquer les données provenant des modèles climatiques à l'évaluation des changements futurs des paramètres pertinents aux sécheresses (voir aussi Chun *et al.*, 2012; 2012 sous presse), et à l'identification des régions du pays qui pourraient être particulièrement exposées à une hausse de la fréquence et/ou de l'intensité des périodes de sécheresse. Il faudrait aussi disposer de meilleures méthodologies pour intégrer la télédétection par satellite et les mesures sur le terrain aux fins de la surveillance et de la gestion des sécheresses, d'une base de données sur l'approvisionnement en eau et d'une meilleure intégration des modèles climatiques planétaires et régionaux aux modèles hydrologiques de répartition (Bonsal *et al.*, 2011).



Afin de résoudre les nombreuses difficultés que pose l'amélioration des prévisions climatiques, il importe de jumeler les efforts canadiens et internationaux. Il est difficile de prédire avec précision les conditions climatiques nationales, régionales ou locales si les prévisions à l'échelle mondiale qui sous-tendent cet exercice sont erronées (Taylor *et al.*, 2012). Les estimations actuelles des conditions climatiques futures dans le monde laissent place à un large éventail de scénarios possibles (Maslin et Austin, 2012), et il importe de s'attaquer à ces questions parallèlement aux efforts déployés pour améliorer notre capacité de comprendre et de gérer nos propres défis climatiques. Le Canada contribue à ces efforts internationaux et il en retire des avantages.

Investir dans la recherche pour comprendre les changements et la variabilité du climat, notamment afin d'améliorer les prévisions, est essentiel pour aider les gouvernements, les producteurs agricoles et les autres groupes intéressés à prendre des décisions de gestion efficaces. Cela peut être particulièrement important pour saisir les occasions qui s'offriront dans l'avenir, puisque le changement climatique à l'échelle planétaire pourrait faire sentir ses effets sur les marchés d'exportation des produits agricoles canadiens. Le changement climatique rendra de nombreux pays arides encore plus secs, et nombre de ces pays importent déjà une part appréciable de leurs produits alimentaires (Banque mondiale, 2010). En fait, divers scénarios à l'échelle mondiale prédisent que les pays en développement devront accroître leurs importations nettes de céréales dans une proportion de 10 à 40 % par suite du changement climatique (Fischer *et al.*, 2005). Cela pourrait se traduire par de nouveaux marchés pour les produits agricoles canadiens. Cependant, toute décision visant à accroître la production agricole ou à produire des produits agricoles différents pour l'exportation aura sans aucun doute des répercussions sur la consommation d'eau, ce qui signifie qu'il est essentiel de bien comprendre l'état actuel et futur des ressources hydriques.

### **Gouvernance et gestion de l'eau au Canada**

En termes généraux, *la gouvernance de l'eau* signifie l'éventail des systèmes politiques, sociaux, économiques et administratifs en place pour développer et gérer les ressources hydriques, ainsi que la fourniture de ces services à différents niveaux de la société (Global Water Partnership, 2002). Par ailleurs, *la gestion de l'eau* correspond aux activités opérationnelles menées pour surveiller, protéger et réglementer les ressources hydriques et les écosystèmes aquatiques (Alberta Environment, 2008; Bakker, 2007b). En termes simples, la gouvernance de l'eau établit les règles qui encadrent la gestion de l'eau (Rogers et Hall, 2003). Elle doit prendre en considération les gens et les organismes concernés, leurs rôles et leurs rapports réciproques, ainsi que les institutions officielles et non officielles au sein desquelles se prennent les décisions.

La gouvernance de l'eau au Canada est hautement complexe à cause de la façon dont la constitution canadienne répartit les responsabilités à l'égard de l'eau, du grand nombre d'acteurs qui interviennent et de l'évolution du processus décisionnel. Les responsabilités pour plusieurs fonctions clés sont réparties – et parfois partagées – parmi divers acteurs, dont des organismes internationaux, les administrations fédérales, provinciales/territoriales et municipales, des organisations non gouvernementales et d'autres intervenants (Bakker et Cook, 2011; Environnement Canada, 2010d; TRNEE, 2010a) (voir le chapitre 6).

Une gouvernance efficace de l'eau a une importance capitale pour la prospérité du secteur agricole. Ainsi, des règles imprécises sur le partage des droits d'utilisation de l'eau et des systèmes décisionnels inefficaces engendrent des risques et des incertitudes pour les agriculteurs (voir l'analyse des questions de gouvernance au chapitre 6). Il faut aussi souligner que la production agricole au Canada se déroule sur d'immenses étendues de terres privées. Les agriculteurs canadiens ont donc un rôle important à jouer dans la réussite du régime de gouvernance et de gestion de l'eau. Cependant, de nombreux changements requis pour améliorer à la fois la gestion et la gouvernance de l'eau en vue de renforcer la capacité du secteur agricole à contrer les menaces et à saisir les occasions qui se présentent ne sauraient se limiter au secteur agricole. À titre d'exemple, la viabilité de l'agriculture dépend en partie de l'efficacité des systèmes de répartition de l'eau – mais, dans les provinces canadiennes, la responsabilité de la répartition de l'eau incombe habituellement aux ministères responsables de l'environnement plutôt qu'à ceux qui sont responsables de l'agriculture (de Loë, 2009).

### **La dimension sociale : valeurs inhérentes aux décisions concernant la gestion de l'eau**

Une question essentielle pour les décideurs et les responsables des politiques a trait à la façon d'intégrer diverses considérations liées à la valeur dans les décisions relatives à l'eau. La croissance économique, les besoins environnementaux et les préférences sociales ont tous un lien avec l'utilisation et la préservation des ressources hydriques. L'eau a une valeur économique comme intrant dans les procédés industriels, la production d'énergie et la production agricole; elle fournit des services essentiels à l'environnement, elle soutient les écosystèmes terrestres et aquatiques et elle a une valeur pour divers segments de la société, en termes culturels, spirituels, esthétiques et récréatifs, outre la valeur intrinsèque qui peut être attribuée aux écosystèmes qui dépendent de l'eau. L'accès à de l'eau propre est, bien entendu, essentiel à la vie humaine et animale – ce qui, en un sens, rend cette ressource inestimable.

La nature des ressources hydriques soulève un certain nombre de problèmes interreliés pour la société. Les ressources hydriques possèdent souvent plusieurs des caractéristiques habituelles d'une ressource commune : l'accessibilité non exclusive, des effets externes (coûts externes) et la rivalité parmi les utilisateurs<sup>13</sup>. Étant donné que l'eau est nécessaire à la vie et qu'elle fait partie intégrante de nombreuses utilisations économiques et sociales, l'accès à cette ressource en est venu à être considéré comme un « droit », habituellement gratuit ou accessible à un coût minimal (Cosgrove et Rijsberman, 2000a). Cela permet au public de profiter de nombreuses activités et formes d'utilisation qui dépendent des ressources hydriques. En certains endroits, l'eau est à la fois largement accessible et s'écoule sur de multiples propriétés privées. Il est alors plus difficile d'empêcher les gens d'avoir accès à l'eau ou d'avoir un impact sur l'eau de diverses façons (Aylward *et al.*, 2010; Perman *et al.*, 2011).

Étant donné ces caractéristiques de non-exclusivité, l'eau a tendance à être utilisée d'une façon qui reflète principalement sa valeur comme intrant dans la production. Les effets sur les autres acteurs – sous la forme d'effets externes – ne sont habituellement pas intégrés au prix ou à l'utilisation de l'eau, notamment en l'absence de réglementation ou de mesures incitatives à l'effet contraire. Un exemple typique est celui d'une source d'eau polluée par une utilisation industrielle : la valeur de la production industrielle peut être accaparée par les propriétaires de l'établissement industriel, tandis que les coûts de la pollution sont transférés à d'autres. Un autre exemple est l'extraction de l'eau à des fins d'irrigation agricole; cette activité engendre une valeur pour les agriculteurs et la collectivité locale, mais elle ne tient pas forcément compte du débit nécessaire pour répondre aux besoins des utilisateurs en aval ou à ceux de l'écosystème local (Aylward *et al.*, 2010).

L'importance de l'eau, son caractère non exclusif et la présence possible d'effets externes sont certaines des raisons pour lesquelles une réglementation et des mécanismes incitatifs ont été mis en place pour régir et gérer les ressources hydriques. Aussi longtemps que l'eau est abondante et que les pressions concurrentes sur les ressources hydriques ne sont pas trop grandes, des structures de réglementation peuvent être élaborées pour gérer l'eau de façon à ne pas entraver indûment la jouissance de cette ressource commune et de ses avantages par la plupart des utilisateurs. Cependant, à mesure que l'eau se fait plus rare et que la concurrence s'intensifie, les défis posés par la gestion de la ressource pour répondre à des besoins potentiellement concurrents (ou rivaux) parmi les utilisateurs deviennent plus complexes (Burchi *et al.*, 2009). Progressivement, des choix doivent être faits quant

---

13 Sur la nature des ressources communes, voir Perman *et al.*, 2011.

aux utilisations permises et des priorités établies parmi les utilisateurs; en outre, il faut déterminer qui devrait assumer les coûts des décisions de gestion inhérentes à la répartition et à la conservation de l'eau. Cela engendre une complication supplémentaire : étant donné que l'eau est une ressource commune essentielle à de nombreuses activités, il y a habituellement de multiples intervenants ayant diverses revendications et préférences sociales qui doivent être prises en considération au moment de prendre ces décisions de gestion.

Ces caractéristiques de l'eau ont de sérieuses conséquences pour le secteur agricole. L'agriculture est l'un des nombreux secteurs au Canada qui ont besoin d'avoir accès à l'eau, et l'accès continu de ce secteur à l'eau dépendra non seulement de facteurs tels que le changement climatique et la demande des secteurs concurrents, mais aussi de l'autorisation donnée par la société de poursuivre de telles activités. Ainsi, par le passé, les besoins en eau de l'environnement n'ont pas constitué une grande priorité sociale au Canada. Aujourd'hui, les Canadiens réclament des écosystèmes aquatiques sains. Dans certaines régions du pays, l'environnement est donc devenu le concurrent le plus important pour les ressources en eau.

### **Politique agricole et réglementation**

La politique agricole – au niveau tant fédéral que provincial – a une grande influence sur les décisions touchant l'utilisation de l'eau en agriculture. Au niveau fédéral, le Canada a poursuivi une stratégie d'exportation en cherchant à établir un secteur agricole concurrentiel à l'échelle internationale. Cela accentue l'influence des cours mondiaux des denrées agricoles sur les stratégies de production, ce qui incite probablement les provinces et les agriculteurs à concevoir des stratégies pour exploiter les débouchés créés par l'augmentation de la demande internationale. Du même coup, l'objectif de la politique agricole est de faire coïncider l'agriculture aux intérêts du public, tout en tenant compte des préoccupations environnementales, économiques et sociales. En ce sens, le cadre de politique peut servir à encourager le développement et l'adoption de pratiques de conservation de l'eau et à décourager les pratiques qui ont des effets nuisibles sur la gestion durable de l'eau. Au cours de la dernière décennie, le Cadre stratégique pour l'agriculture du Canada (CSA, Cultivons l'avenir)<sup>14</sup> a mis de plus en plus l'accent sur une gestion proactive des risques par des programmes directement accessibles aux agriculteurs. Ces programmes peuvent aider les producteurs agricoles à surmonter les obstacles à l'investissement et leur offrir des solutions pour se protéger contre certains risques. De plus, les politiques cadres peuvent servir à accorder du financement

---

14 Voir <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?lang=fra&id=1200339470715>.

par le biais de programmes ciblés, comme le Saskatchewan Farm and Ranch Water Infrastructure Program<sup>15</sup> et l'Alberta Water Management Program<sup>16</sup>, qui encouragent l'élaboration de plans de gestion à long terme de l'eau.

Alors que les priorités du prochain cadre de politique agricole (Cultivons l'avenir II) sont en voie d'élaboration, l'un des volets actuellement débattus viserait à élaborer des approches intégratives localisées pour adapter les activités [...] aux circonstances et aux défis régionaux et locaux, permettre la participation des groupes intéressés et cibler les initiatives environnementales tout en répondant aux défis et en coordonnant les actions à une échelle plus grande pour des régions géographiques communes<sup>17</sup>. Ces approches pourraient inclure l'élaboration de stratégies intégrées de gestion de l'eau tenant compte des besoins de l'agriculture et des autres utilisations concurrentes, tout en assurant une gestion durable de l'eau à long terme.

### Ressources humaines et développement des compétences

Un secteur agricole dynamique requiert une réflexion progressive et une main-d'œuvre hautement scolarisée. L'occasion est propice pour évaluer les besoins futurs en ressources humaines et en compétences de ce secteur et pour combler ces besoins en renforçant ou en créant des programmes de formation en établissement et en milieu de travail. Une surveillance et une gestion efficaces des ressources hydriques utilisées en agriculture nécessitent des connaissances et une expertise qui faciliteront du même coup une optimisation et une plus grande efficacité dans l'utilisation de la ressource, l'innovation et l'exploitation des débouchés qui s'offrent sur le marché.

En Ontario, le secteur agricole et agroalimentaire occupe une place importante dans l'économie, avec un PIB estimé à 38 milliards de dollars (à l'exclusion du commerce de détail et des services alimentaires) (JRG Consulting, 2012). Ce secteur englobe les exploitations agricoles, les fournitures et les intrants agricoles, ainsi que les industries de services, y compris les services financiers. Il comprend aussi le traitement des produits de la ferme et la transformation et la préparation subséquente des aliments. Le secteur agricole emploie plus de 200 000 personnes en Ontario, sans compter la distribution alimentaire, le commerce de détail et les services. Le personnel hautement qualifié possédant les compétences requises à l'emploi des entreprises de ce secteur contribue

---

15 Farm and Ranch Water Infrastructure Program; voir : <http://www.agriculture.gov.sk.ca/Default.aspx?DN=f5474b70-dbd1-4e44-8b1f-cd4ebfb1c516>.

16 Alberta Water Management Program; voir <http://www.growingforward.alberta.ca/ProgramAreas/EnhancedEnvironment/WaterManagement/WaterManagementDetail/index.htm>.

17 Le programme des approches innovatrices d'AAC; voir <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1292522946065etlang=fra>.

non seulement à la réussite de ces dernières, mais à celle de l'ensemble du secteur. Une étude détaillée du secteur, fondée sur des entrevues et réalisée à la fin de 2011, a montré que 60 % des employeurs préféreraient embaucher des personnes possédant une formation structurée en agriculture et en alimentation (JRG Consulting, 2012). Ces employeurs prévoient une augmentation de 10 à 20 % de la demande en personnel au cours des prochaines années. L'étude a aussi révélé que l'exigence relative à la détention d'un diplôme officiel (de premier cycle ou de cycle supérieur) dépassait nettement l'offre actuelle de diplômés en Ontario, signalant un besoin urgent d'intensifier les efforts de recrutement et d'expansion des programmes de formation (JRG Consulting, 2012).

### **2.3 SAISIR LES OCCASIONS ET FAIRE FACE AUX DÉFIS : UNE GESTION ADAPTATIVE**

Devant un avenir incertain, il est probable que de nouvelles approches seront requises sur le plan des politiques et de la gestion, avec les conséquences qui en découlent pour la gouvernance. Lempert et Schlesinger (2000) ont examiné les limites des politiques traditionnelles reposant sur des prévisions, où la politique optimale est définie en assignant des probabilités à plusieurs scénarios d'avenir plausibles. Les auteurs affirment que face à des problèmes complexes, qui comportent des niveaux élevés d'incertitude future, une telle analyse ne convient pas parce que a) le concept de politique optimale suppose un décideur unique et rationnel tandis que la société est constituée d'une multitude d'acteurs ayant des attentes différentes face à l'avenir; b) les politiques optimales peuvent être « fragiles » s'il arrive quelque chose d'inattendu (p. ex. un événement lourd de conséquences mais ayant une faible probabilité de se produire). Ils soutiennent que la société devrait plutôt chercher à se doter de stratégies robustes (c.-à-d. non sensibles à l'incertitude future) et que les stratégies décisionnelles adaptatives peuvent constituer une réponse robuste face à l'incertitude climatique future. De façon similaire, mais dans un contexte différent, celui de la gestion des risques d'inondation, Sayers *et al.* (2012) affirment qu'une gestion adaptative pourrait concourir à une prise de décision robuste en situation d'incertitude. Selon Camacho (2009), une gouvernance fragmentée convient mal au changement climatique, et l'auteur propose l'adoption d'un cadre de gouvernance adaptative dans lequel les utilisateurs obligeront les organismes à surveiller et à adapter systématiquement leurs décisions et leurs programmes.

La gestion adaptative offre au secteur agricole une approche pour réagir face aux possibilités et aux défis qui s'annoncent. Élaborée sur plusieurs décennies avec l'apport de domaines tels que les affaires, la science expérimentale, la théorie des systèmes et l'écologie industrielle (NAS, 2004a; Williams, 2011), la gestion adaptative mise sur l'apprentissage itératif pour parvenir à une meilleure compréhension des systèmes de ressources (ou des défis systémiques) et, ainsi, améliorer les résultats de la gestion (Williams, 2011). La gestion adaptative

va au-delà des méthodes essais-erreurs pour emprunter une approche structurée qui intègre constamment de nouveaux renseignements dans les décisions de gestion, ce qui permet aux décideurs et aux parties prenantes d'ajuster leurs initiatives pour obtenir de meilleurs résultats (Allen *et al.*, 2011; Williams, 2011). La gestion adaptative est appliquée à un large éventail de domaines dont les ressources naturelles (Stankey *et al.*, 2005), les stratégies d'entreprise (Hope, 2006) et la santé publique (Hess *et al.*, 2012).

Bien qu'il y ait de nombreux modèles de gestion adaptative, certains aspects sont communs à tous. Parmi ceux-ci, il y a les objectifs de gestion revus régulièrement et révisés selon les circonstances, l'élaboration d'un ou de plusieurs modèles du système géré, la présence d'une gamme de choix de gestion, la surveillance et l'évaluation des résultats, les mécanismes d'intégration de l'apprentissage dans les décisions futures et des structures de collaboration propices à la participation et à l'apprentissage des groupes intéressés (adapté de NAS, 2004a). Les observations du comité d'experts sur la contribution potentielle de la gestion adaptative à la gestion durable de l'eau en milieu agricole sont présentées plus en détail au chapitre 3 et dans les conclusions du rapport.

### Points saillants du chapitre

- Au cours des prochaines décennies, la croissance démographique et la hausse des revenus dans le monde engendreront des occasions exceptionnelles pour l'agriculture sous la forme d'une augmentation de la demande d'aliments et d'autres produits agricoles. La hausse des revenus devrait aussi engendrer une demande croissante pour des aliments de plus grande valeur ayant un contenu plus élevé en eau, comme la viande et les produits laitiers.
- Afin de maximiser les débouchés qui accompagneront ces tendances, les risques et les incertitudes associées à l'évolution des conditions du marché, à la concurrence accrue pour les ressources, au changement climatique et à d'autres facteurs devront être gérés prudemment afin d'assurer la viabilité du secteur agricole canadien.
- Il importe notamment d'investir en recherche pour améliorer notre compréhension du changement climatique et de la variabilité du climat et aider les gouvernements, les producteurs agricoles et les autres parties concernées à prendre des décisions efficaces en matière de gestion.
- La capacité de faire face aux menaces et de saisir les occasions qui s'offrent dépend dans une large mesure d'une gestion durable de l'eau reposant sur des bases solides, dont l'un des éléments clés est une gouvernance efficace.
- La gestion adaptative offre un cadre utile pour répondre à ces possibilités tout en atténuant les risques et en gérant les incertitudes.

# 3

## **Connaissances entrant dans les décisions de gestion : la quantité et la qualité des ressources hydriques du Canada et les besoins au niveau de la surveillance, de la modélisation et de la gestion adaptative**

- La gestion de l'eau aux fins de l'agriculture au Canada
- Problèmes liés à la quantité d'eau : disponibilité de l'eau et utilisations concurrentes
- Les problèmes de qualité de l'eau : les nutriments, les pesticides, les agents pathogènes et les autres facteurs de risque
- Le besoin d'éclairer la gestion de l'eau à l'aide de renseignements sur la quantité, l'utilisation et la qualité de l'eau
- L'état de la surveillance de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau au Canada
- Le rôle de la modélisation, de la prévision et de la gestion adaptative



### **3. Connaissances entrant dans les décisions de gestion : la quantité et la qualité des ressources hydriques du Canada et les besoins au niveau de la surveillance, de la modélisation et de la gestion adaptative**

#### **Aperçu**

Alors qu'augmentent les pressions au niveau de la quantité et de la qualité de l'eau dans plusieurs régions du Canada, le secteur agricole et les autres secteurs qui utilisent de grandes quantités d'eau doivent évoluer vers une gestion plus durable de l'utilisation et de la consommation de l'eau. La gestion des ressources hydriques nécessite des renseignements adéquats sur la disponibilité, l'utilisation et la qualité de l'eau, des aspects où il y a de sérieuses lacunes importantes sur les plans de la surveillance et de la disponibilité d'ensembles de données intégrés. Une capacité intégrée de surveillance et de prévision de l'eau et du climat au Canada permettrait de mieux gérer les risques en milieu agricole, notamment dans le contexte de la non-stationnarité hydrométéorologique sans précédent causée par le changement climatique. La recherche émergente sur la modélisation, la prévision et la gestion adaptative pourrait jouer un rôle clé en vue de définir et de gérer les risques.

Une compréhension de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau est essentielle à la réussite du secteur agricole canadien. Les cultures irriguées et l'élevage requièrent un accès fiable à des quantités suffisantes d'eau douce de bonne qualité, tandis que l'agriculture non irriguée dépend des précipitations (et de la gestion connexe de l'eau dans le sol). Parallèlement, la production agricole peut avoir un impact majeur sur la disponibilité et la qualité de l'eau (Foley *et al.*, 2005). À mesure que s'intensifie la production agricole, ces pressions sur l'environnement soulèvent des préoccupations croissantes. Cependant, elles ne se s'exercent pas de façon isolée. Partout dans le monde, la croissance démographique, l'expansion urbaine, le développement industriel et la croissance économique – sans compter l'intensification des activités agricoles – engendrent des pressions croissantes sur les ressources terrestres et hydriques et sur la qualité de l'environnement. Par conséquent, là où des effets néfastes sont observés, ils sont souvent la conséquence de divers facteurs provenant de multiples secteurs de l'économie. Afin de mieux guider la gestion durable de l'eau en agriculture, il est essentiel de bien comprendre ces effets.

Le présent chapitre examine l'état des ressources hydriques pour l'agriculture. La section 3.1 débute par une définition du contexte et des objectifs de la gestion de l'eau en agriculture. La section 3.2 aborde les questions touchant à la quantité d'eau, tandis

que la section 3.3 traite des questions liées à la qualité de l'eau. La section 3.4 présente un sommaire des besoins en information sur la qualité de l'eau, la quantité d'eau et l'utilisation de l'eau, qui débouche, à la section 3.5, sur une analyse de l'état de la surveillance de l'eau. Cette analyse montre qu'à mesure qu'augmentent les pressions au niveau de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau dans les régions agricoles du Canada, l'agriculture et les autres secteurs devront améliorer de manière significative les instruments de mesure pour évoluer vers un régime de gestion plus durable d'utilisation et de consommation de l'eau. Le comité d'experts est avis qu'un régime intégré de surveillance de l'eau et du climat et une capacité intégrée de surveillance et de prévision de l'eau et du climat au Canada permettraient de mieux gérer les risques pour le secteur agricole, notamment dans le contexte de non-stationnarité hydrométéorologique sans précédent engendré par le changement climatique. Dans le cadre d'une telle approche, le comité souligne par ailleurs que le recours à la modélisation, à la prévision et à la gestion adaptative pourrait permettre de mieux cerner et gérer les risques. Les besoins en recherche dans ces domaines sont examinés dans la conclusion du chapitre (section 3.6).

### **3.1 LA GESTION DE L'EAU AUX FINS DE L'AGRICULTURE AU CANADA**

Comme il est expliqué au chapitre 2, l'analyse des ressources hydriques aux fins de l'agriculture doit faire la distinction entre a) l'eau prélevée dans les rivières, les lacs, les réservoirs et les eaux souterraines à des fins d'irrigation, d'activités intensives d'élevage et d'autres utilisations agricoles, qui peut entrer en concurrence avec d'autres utilisations de l'eau; b) l'eau nécessaire pour l'agriculture non irriguée, qui dépend des précipitations naturelles, sous forme de pluie ou de neige et qui peut englober la neige redistribuée par des méthodes de gestion de la neige<sup>18</sup>.

#### **La gestion des systèmes de ressources hydriques**

Une caractéristique importante de l'utilisation de l'eau bleue est qu'elle constitue l'un de nombreux volets des demandes concurrentes pour les ressources hydriques qui, dans la plupart des régions du Canada, sont gérées à l'échelle du bassin hydrographique ou de la nappe phréatique par le gouvernement provincial (les aspects de la gestion de l'eau qui concernent la gouvernance sont examinés au chapitre 6). Les ressources en eau de surface comprennent les rivières, les lacs et les réservoirs, ces derniers assurant le stockage artificiel de l'eau provenant des cours d'eau et du ruissellement local pour maintenir le niveau d'utilisation de l'eau lorsque la demande dépasse la quantité pouvant

---

18 Bien que l'on discute couramment de la gestion de l'eau à grande échelle en faisant appel aux concepts de l'eau verte et de l'eau bleue, le comité d'experts reconnaît qu'il s'agit d'aspects interreliés du cycle hydrologique au Canada. À titre d'exemple, les précipitations qui tombent dans un champ ou les rafales de neige peuvent provenir d'une source d'eau verte ou d'eau bleue, de sorte que l'application de ces concepts pour la gestion de l'eau à échelle réduite est problématique dans certains cas.

être fournie par le système naturel. Les réservoirs servent habituellement à atténuer la variabilité saisonnière des débits mais, s'ils sont de grande dimension, ils peuvent aussi servir à atténuer la variabilité interannuelle. Les réservoirs servent généralement plusieurs fonctions, par exemple l'approvisionnement en eau de la population, l'irrigation, l'activité industrielle, la production d'énergie hydroélectrique, les activités de loisirs et l'atténuation des crues, qui représentent souvent des sources de demande concurrentes. Il est souhaitable pour la production hydroélectrique et la sécurité des approvisionnements que les niveaux d'eau dans les réservoirs soient élevés; par contre, un faible niveau d'eau dans les réservoirs est préférable lorsqu'on veut réduire les risques d'inondation. Parmi les autres contraintes opérationnelles, il y a la nécessité de protéger les habitats et de gérer la glace sur les cours d'eau. La gestion des ressources en eau de surface comporte habituellement une optimisation du fonctionnement des systèmes de ressources hydriques englobant plusieurs réservoirs et lacs et un grand nombre d'utilisateurs, dont les besoins sont souvent diversifiés et concurrents en termes de débit et de calendrier (y compris le besoin de maintenir les flux environnementaux nécessaires pour préserver les écosystèmes et, dans certains cas, diluer les effluents industriels ou urbains). Dans le cas des systèmes de ressources hydriques complexes, une gestion optimale passe par l'élaboration de modèles mathématiques, et il est possible d'améliorer grandement l'efficacité du système grâce à une prévision exacte des débits des cours d'eau.

Les ressources souterraines sont habituellement plus localisées, mais elles doivent aussi être gérées afin d'équilibrer la capacité de stockage de l'aquifère et les nombreux besoins concurrents. Une gestion durable des eaux souterraines comporte un arbitrage entre la reconstitution de la nappe et la demande à long terme, mais l'estimation de la capacité de recharge des nappes souterraines est une tâche souvent complexe et imprécise (Ng *et al.*, 2010). Une complication supplémentaire liée aux ressources hydriques souterraines est que certains contaminants ont tendance à persister pendant de longues périodes dans les réservoirs souterrains (des années voire des décennies), de sorte que la protection des aquifères est une responsabilité cruciale de la gestion (Schmoll *et al.*, 2006). La portée des interactions entre les nappes d'eaux souterraines et les systèmes d'eaux de surface varie grandement, mais là où les systèmes sont interconnectés, les eaux souterraines doivent aussi être gérées en vue d'atténuer au minimum les dommages causés aux eaux de surface et aux écosystèmes aquatiques.

On peut voir que la gestion de l'eau bleue à des fins agricoles n'est qu'un des multiples volets de la gestion d'un système complexe de ressources hydriques, dans lequel les demandes concurrentes doivent être équilibrées par un processus de gouvernance en respectant les cadres juridiques applicables. Le comité d'experts note qu'il se pose des problèmes techniques nécessitant : a) une solide compréhension des systèmes hydrologiques qui déterminent le niveau d'eau disponible et sa variabilité, b) des données à l'appui de la planification et de la gestion opérationnelle (p. ex. des données hydrologiques et des

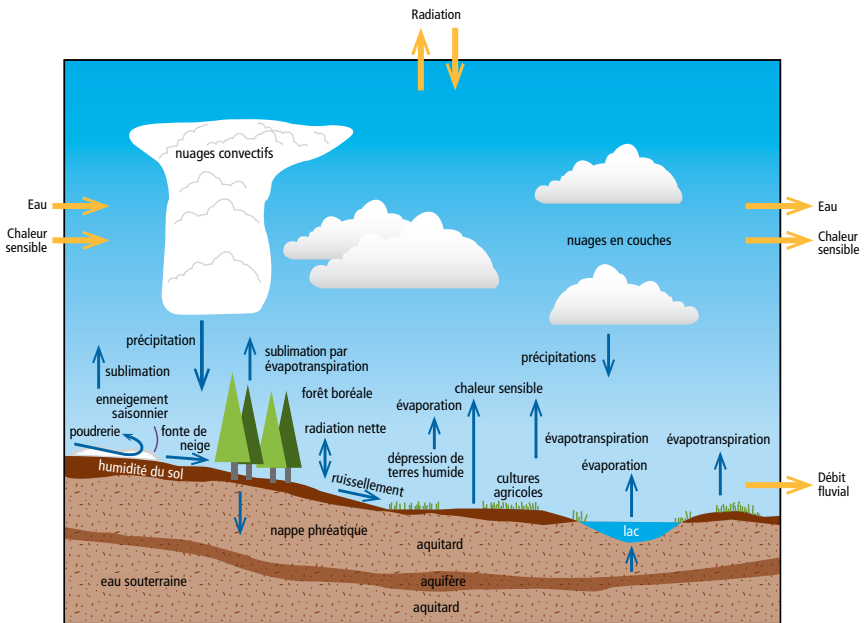
données sur les variables climatiques influant sur le cycle hydrologique et sur la demande d'eau), c) des modèles précis des débits des cours d'eau et des niveaux des nappes d'eaux souterraines, y compris l'impact des prélèvements d'eau et des décisions liées à la gestion opérationnelle, d) la capacité de prévoir les débits des cours d'eau (et, dans certains cas, le niveau des nappes d'eaux souterraines). Certaines questions de gouvernance complexes doivent aussi être abordées, outre les facteurs sociétaux qui interviennent, notamment les perceptions au sujet de l'importance des flux environnementaux et de l'autorisation sociale accordée à la production agricole. Alors que les pressions sur les ressources hydriques disponibles vont en s'intensifiant un peu partout au Canada, l'attention se porte vers la nécessité de faire des choix difficiles entre des utilisations concurrentes et le rôle éventuel des instruments économiques. Le comité d'experts tient à souligner que face à la croissance démographique, à l'expansion économique et à l'évolution rapide des conditions environnementales, la gestion des ressources hydriques est confrontée à des défis sans précédent. Traditionnellement, la planification de l'eau reposait sur l'utilisation de données historiques comme base de prévision de l'avenir. Mais il est aujourd'hui largement accepté que, dans un contexte de changement climatique, le passé n'est plus un guide fiable de l'avenir (Milly *et al.*, 2008); par conséquent, de nouvelles approches pour la gestion des incertitudes futures s'imposent. Ce thème est examiné à nouveau à la section 3.6.

### La gestion de l'eau sur la ferme

Tel que noté au chapitre 2, si l'irrigation est la plus importante utilisation consommatrice d'eau bleue (dans le monde et au niveau régional au Canada), l'agriculture non irriguée est la principale forme d'exploitation des territoires agricoles au Canada. Dans les deux cas, un élément critique de la production agricole est la gestion de l'eau sur la ferme. Certains aspects spécifiques de la gestion de l'eau agricole liés aux méthodes de gestion des terres, à l'irrigation, au drainage et aux PGB, sont examinés plus en détail au chapitre 4.

Sur la ferme, l'eau servant à l'agriculture peut être entreposée sous forme solide, liquide ou gazeuse. Le stockage sous forme solide correspond à l'accumulation saisonnière de neige sur les terres agricoles et au gel saisonnier des sols dans la plus grande partie des Prairies et des autres zones agricoles du pays. Le stockage sous forme liquide correspond aux gouttelettes d'eau dans les nuages, aux nappes d'eaux souterraines, à l'humidité dans le sol et au stockage en surface dans les dépressions, les étangs, les terres humides, les cours d'eau, les lacs et les réservoirs. Le stockage sous forme gazeuse correspond à l'eau qui se trouve dans l'atmosphère. La période durant laquelle l'eau peut être entreposée dans un milieu agricole dépend de son état : sous forme gazeuse, de quelques heures à plusieurs jours; sous forme liquide, entre des heures et des années; sous forme de neige ou de glace, pendant des saisons et jusqu'à des années.

La circulation de l'eau entre la surface terrestre, la sous-surface, l'océan et l'atmosphère est appelée le cycle hydrologique, lequel est associé à un flux d'énergie. L'énergie radiante du soleil et l'énergie atmosphérique sont transportées par les masses d'air et constituent les principales sources d'apport énergétique à la surface du sol. Le changement d'état (chaleur latente) qui se produit lorsque l'eau s'évapore d'une culture ou d'un plan d'eau exposé est une grande source de consommation de cette énergie, avec les transferts d'énergie vers l'atmosphère (chaleur sensible) (figure 3.1). Le cycle hydrologique au Canada est remarquablement saisonnier et dominé par la neige et la glace tout au long de l'hiver, le dégel et le ruissellement au printemps, et les chutes de pluie, l'évaporation et le ruissellement durant l'été et l'automne. À la grandeur du pays, la disponibilité de l'eau, sa qualité et son utilisation varient dans le temps (d'une année et d'une saison à l'autre) et dans l'espace (d'une province à l'autre et d'une région à l'autre dans les provinces). L'importante variabilité saisonnière et régionale dans l'état et le débit de l'eau a une incidence significative sur l'activité agricole dans le contexte canadien.



Adapté de Stewart et al., 2011

Figure 3.1

### Le cycle hydrologique de l'agriculture canadienne

Cette figure illustre la dynamique du cycle hydrologique dans un environnement agricole conceptualisé. Ce cycle comprend les précipitations de neige et de pluie, le stockage et la sublimation de la neige, la fonte rapide des neiges au printemps, l'infiltration de l'eau de fonte ou de pluie dans le sol, le stockage et l'évaporation de l'eau au sol, le stockage et l'évaporation de l'humidité dans le sol, l'écoulement de l'eau dans les formations aquifères et le ruissellement en surface et sous la surface vers les ruisseaux et les lacs du bassin de la rivière.

Le comité d'experts est d'avis que la gestion de l'eau sur la ferme vise quatre objectifs, pour lesquels le cycle hydrologique est manipulé par des modifications physiques au paysage (p. ex. le détournement d'eau), la technologie (p. ex. l'irrigation) ou les PGB (p. ex. la rétention de la neige, les pratiques de travail du sol réduites ou l'amélioration du drainage) :

1. Promouvoir la photosynthèse dans les plantes cultivées durant la transpiration en maintenant le niveau d'humidité du sol au-dessus du seuil de flétrissement dans la rhizosphère;
2. Faciliter l'ensemencement, le travail du sol et la récolte en réduisant l'excès d'humidité dans le sol et l'eau emprisonnée dans des flaques dans les champs;
3. Prévoir des zones de stockage de l'eau en surface sur la ferme, dans des étangs ou des lacs pour l'alimentation du bétail et l'irrigation;
4. Gérer la quantité et la qualité des effluents des terres agricoles, et notamment prévoir des mécanismes d'élimination des sous-produits des activités agricoles (p. ex. l'épandage du fumier sur les terres cultivées, l'élimination des déchets liquides par ruissellement, l'écoulement de restitution des systèmes d'irrigation et le nettoyage du matériel agricole).

Le premier objectif (promouvoir la photosynthèse) peut se réaliser grâce à l'irrigation, la gestion de la neige et les méthodes de travail des sols, ainsi que par la sélection de plantes ayant un système racinaire et des caractéristiques d'utilisation de l'eau appropriés. Le deuxième objectif (faciliter l'ensemencement, le travail du sol et la récolte) peut être atteint par un système de drainage par canalisations, le drainage des terres humides et la construction de ponceaux et de canaux dans les régions rurales en vue d'améliorer le drainage. Le troisième objectif (stocker de l'eau sur la ferme) peut se réaliser par la gestion des cours d'eau en amont, des canalisations d'alimentation en eau, des mares artificielles, le drainage par canalisations, la gestion de la neige, le pompage des eaux souterraines et la construction de barrages de retenue. Le quatrième objectif (gérer les effluents et éliminer les sous-produits des activités agricoles) peut être atteint notamment par des méthodes de travail du sol, l'épandage de fumier dans les champs pour accroître la fertilité du sol, l'utilisation de bassins de rétention et de terres humides pour ralentir le ruissellement et/ou capter les déchets agricoles là où cela est approprié, le déversement dans un cours d'eau naturel ou sur les berges, ou la construction de canalisations de retour et de fossés de drainage, ainsi que le drainage par canalisations des terres humides. Certaines de ces opérations améliorent la productivité agricole et réduisent la quantité requise d'intrants provenant de l'extérieur de la ferme, tandis que d'autres entrent en concurrence avec les autres utilisations humaines de l'eau (p. ex. les utilisations industrielles et municipales). Enfin, certaines sont dommageables pour l'environnement naturel (p. ex. la colocalisation avec des plans l'eau, les fossés de drainage et le drainage des terres humides).

### 3.2 PROBLÈMES LIÉS À LA QUANTITÉ D'EAU : DISPONIBILITÉ DE L'EAU ET UTILISATIONS CONCURRENTES

#### Disponibilité de l'eau pour l'agriculture

L'eau disponible pour l'agriculture doit concourir aux quatre objectifs de la gestion de l'eau agricole énumérés à la section 3.1. La disponibilité de l'eau sur la ferme est déterminée par les précipitations qui tombent directement sur les terres agricoles, la redistribution éolienne de la neige, le stockage de l'eau sur la ferme et les pertes d'eau par évaporation et sublimation. À plus grande échelle, la disponibilité de l'eau est déterminée par la concentration en aval de l'eau s'écoulant dans les bassins fluviaux et le mouvement des eaux souterraines à travers la sous-surface en fonction du cycle hydrologique (AAC, 2010a; Gray, 1970). La disponibilité de l'eau a un important élément saisonnier parce que la consommation d'eau agricole survient principalement durant l'été, tandis que l'alimentation en eau est répartie sur toute l'année. Par conséquent, la disponibilité de l'eau dépend de l'humidité présente dans le sol au cours de l'été, des eaux de surface et des eaux souterraines. Parmi les autres contraintes à la disponibilité, il y a des facteurs tels que la répartition de l'eau entre les utilisations concurrentes, le manque d'information sur les ressources en eaux de surface et en eaux souterraines, le manque d'information sur l'offre et la demande d'eau et la piètre qualité de l'eau (AAC, 2003c).

En évaluant la disponibilité de l'eau, le comité d'experts a constaté que les indicateurs les plus courants sont l'eau présente sous forme d'humidité dans le sol, l'eau stockée en surface, l'eau stockée dans les nappes souterraines, les précipitations, la demande d'évaporation et le débit des cours d'eau, mais leur importance relative varie selon la nature de la production agricole. Pour l'agriculture non irriguée, les précipitations qui tombent dans les champs, le potentiel de rétention de la neige, la demande d'évaporation et l'humidité du sol sont les indicateurs clés; pour l'agriculture irriguée, les données sur les chutes de pluie et l'accumulation de neige en amont, le stockage dans les réservoirs et les nappes souterraines, l'utilisation de l'eau en amont et le débit des cours d'eau sont les facteurs les plus importants; pour la transformation des sous-produits de l'agriculture, ce sont la distance par rapport aux cours d'eau, la fréquence du ruissellement dans les champs et le débit des cours d'eau qui ont le plus d'importance. En outre, les approvisionnements en eau dans les sources de surface et souterraines, ainsi que les deux derniers objectifs de la gestion de l'eau agricole énoncés précédemment, requièrent une évaluation cumulative de la disponibilité de l'eau et des effets connexes pour l'ensemble du bassin hydrographique et/ou de la nappe d'eau souterraine.

Le potentiel d'expansion de l'agriculture peut être influencé par la disponibilité et la variabilité des approvisionnements en eau. Comme le démontre la figure 3.2, plusieurs grandes régions agricoles subissent déjà des niveaux élevés de stress hydrique. Cependant,

il importe d'évaluer aussi la variabilité et les tendances temporelles de la disponibilité de l'eau. La figure 3.3 fait voir les débits naturalisés et réels de la rivière Saskatchewan Sud depuis 1912 à titre d'exemple de la variabilité interannuelle élevée et des tendances possibles à long terme de la disponibilité de l'eau bleue dans les régions agricoles. Les débits naturalisés ont diminué de 12 % depuis 1912, tandis que les débits réels sont aujourd'hui de 40 % inférieurs aux débits naturalisés du début du 20<sup>e</sup> siècle. En faisant l'hypothèse que les débits réels et naturalisés étaient à peu près égaux au début du 20<sup>e</sup> siècle, 70 % de la baisse de 40 % observée des débits réels depuis cette époque serait attribuable à la consommation en amont et 30 % serait attribuable à des changements hydrologiques. On ignore dans quelle mesure le changement climatique et les changements au niveau de l'utilisation des terres dans les régions montagneuses et piémontaises où sont situées les sources d'eau ont eu un impact sur l'hydrologie du bassin au cours du dernier siècle. Le message principal qui se dégage est que la disponibilité de l'eau bleue et de l'eau verte n'est pas illimitée au Canada à des fins d'expansion ou d'intensification



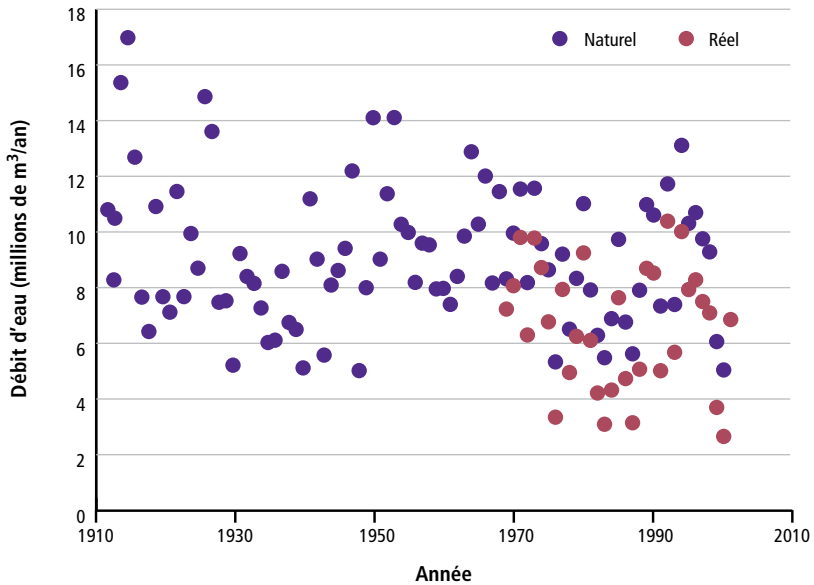
Source des données : Environnement Canada, 2011g

**Figure 3.2**

### **Menaces pour la disponibilité de l'eau par sous-région de drainage au Canada, 2007**

Cette figure illustre la menace pour la disponibilité de l'eau par sous-région de drainage au Canada en 2007. Il y a une menace élevée pour la disponibilité de l'eau dans certaines régions du sud-ouest du Manitoba, du sud de la Saskatchewan, du sud de l'Alberta et du sud de l'Ontario. Il y a aussi une menace variant de modérée à moyenne dans la vallée de l'Okanagan en Colombie-Britannique.





Source des données : calculs de John Pomeroy fondés sur des données d'Environnement Alberta.

Figure 3.3

### Débites naturalisé et réel de la rivière Saskatchewan Sud au cours du dernier siècle

Ce graphique montre le débit naturalisé (répartition des débits estimatifs par Environnement Alberta) et le débit réel de la rivière Saskatchewan Sud en aval du confluent avec la rivière Red Deer près de la frontière de l'Alberta et de la Saskatchewan. Il démontre la variabilité interannuelle élevée du débit d'eau dans le sud des Prairies, y compris les faibles débits des années 1930 et 1980 et les sécheresses du début des années 2000, la baisse graduelle de la disponibilité de l'eau au fil du temps et la différence croissante entre ce que seraient les débits en l'absence des prélèvements de l'industrie, des municipalités et de l'agriculture et les débits actuels.

de la production agricole, et qu'il y a déjà de sérieuses menaces à la disponibilité de l'eau dans certaines parties de l'intérieur de la Colombie-Britannique, des provinces des Prairies et du Sud de l'Ontario, ainsi que des contraintes importantes liées à l'eau pour la productivité actuelle de l'agriculture dans diverses régions.

### La demande d'eau du secteur agricole et des autres secteurs

Tel que décrit au chapitre 2, si l'agriculture *utilise* une quantité relativement limitée d'eau en comparaison des autres secteurs, c'est ce secteur qui, globalement, *consomme* le plus; cela a des conséquences importantes pour les budgets consacrés à l'eau et la disponibilité des ressources hydriques pour les utilisations concurrentes (Beaulieu *et al.*, 2001; TRNEE, 2010a). La consommation d'eau agricole est habituellement définie comme étant la perte d'eau dans la couche située près de la surface par évapotranspiration durant la photosynthèse des cultures, l'évaporation directe de l'eau stockée, l'eau irriguée et l'eau

retenue dans les plantes. Cependant, l'évapotranspiration et l'évaporation retournent d'énormes quantités d'eau dans l'atmosphère à partir des terres agricoles. Le comité d'experts note également que même si une partie de l'eau évaporée se transforme en précipitations dans le bassin hydrographique et peut y retourner sous forme de pluie ou de ruissellement, la plus grande partie échappe à l'approvisionnement régional en eau (Szeto *et al.*, 2008).

La vaste majorité (97,6 %) des terres agricoles ensemencées au Canada dépend des précipitations et n'est pas irriguée (AAC, 2011c) et, selon des rapports, seulement 8,5 % des terres cultivées avaient recours à l'irrigation en 2006 (AAC, 2011c). Cependant, sur l'ensemble des prélèvements d'eau à des fins agricoles, la majorité (soit environ 83 % en 2005) servait à l'irrigation des cultures, le reste étant principalement utilisé pour l'élevage (Statistique Canada, 2010b). L'eau de surface employée pour l'irrigation provient principalement de rivières, de lacs ou de réservoirs, souvent situés à de grandes distances des régions agricoles, tandis que les sources d'eaux souterraines sont généralement exploitées à l'aide de puits de grande capacité situés près des terres irriguées. L'eau prélevée pour l'irrigation montre des taux d'évapotranspiration beaucoup plus élevés que ceux observés pour l'agriculture non irriguée ou la végétation naturelle; la plus grande partie de l'eau prélevée ne revient pas vers les cours d'eau après l'irrigation et peut donc être considérée comme une consommation d'eau.

Un peu moins de 530 000 hectares de terres cultivées au Canada étaient irrigués en 2010 (Statistique Canada, 2011b). La grande majorité était située dans la partie ouest du pays. Selon des estimations, c'est l'Alberta qui utilise la plus grande quantité d'eau à des fins d'irrigation (59 % du total national en 2010), suivie de la Colombie-Britannique (28 %), de la Saskatchewan (5,4 %), du Manitoba (2,9 %) et de l'Ontario (2,4 %). Les autres provinces utilisent 2 % ou moins du total national. En 2010, la plus grande partie de l'eau prélevée à des fins d'irrigation au Canada (52 %) a servi à alimenter des grandes cultures et des cultures fourragères (dont l'orge et la pomme de terre), et la culture du foin (31 %), de fruits et légumes (9,3 %) et de pâturages (7,3 %). Dans les provinces des Prairies, l'irrigation est principalement utilisée pour les grandes cultures, la culture du foin et les pâturages, tandis qu'en Colombie-Britannique et en Ontario elle sert principalement à la culture des fruits et légumes (Statistique Canada, 2011b). Les sources d'eau d'irrigation en Alberta, en Colombie-Britannique et en Saskatchewan (qui comptent pour plus de 90 % de l'irrigation au Canada) sont situées dans les hautes montagnes de l'Alberta et de la Colombie-Britannique, où les fortes précipitations au printemps et en été ainsi que l'accumulation de la neige en hiver, avec une pointe de fonte survenant au début de l'été, ont historiquement assuré des approvisionnements en eau stables, généralement adéquats et arrivant au moment opportun pour l'irrigation. Le réchauffement des Rocheuses canadiennes et la diminution concomitante des accumulations de neige au printemps pourrait avoir un impact sur le calendrier,

la durée et le volume des écoulements d'eau provenant des montagnes, et nécessiter des changements dans la gestion de l'eau et une réévaluation du potentiel d'irrigation des régions en aval (Mote *et al.*, 2005; Stewart *et al.*, 2005). À titre d'exemple, lors de la sécheresse de 2001, on a eu recours à des réductions volontaires des prélèvements destinés à l'irrigation en Alberta à cause de la faiblesse de l'écoulement printanier provenant des montagnes (Rood et Vandersteen, 2010).

Dans le secteur de l'élevage, l'eau sert principalement à abreuver les animaux, à nettoyer les installations, à assainir le matériel et à diluer le fumier (Corkal et Adkins, 2008; Kienholz *et al.*, 2000). Bien que l'élevage du bétail consomme beaucoup moins d'eau que les cultures, cette activité a des répercussions importantes sur l'environnement naturel, dont des émissions de gaz à effet de serre, la contamination possible de l'eau de surface et des eaux souterraines, l'érosion du sol et la qualité de l'air. En outre, l'élevage requiert un approvisionnement stable en eau de grande qualité. Fait à noter, si l'utilisation de l'eau pour l'élevage est répandue dans toutes les régions agricoles du pays, dont plusieurs bénéficient d'un bon approvisionnement en eau, l'irrigation est concentrée dans des régions où la disponibilité restreinte de l'eau donne lieu à un stress hydrique élevé (de Loë, 2005).

### Utilisations concurrentes

Dans toutes les régions, la consommation d'eau bleue par l'agriculture est en concurrence avec les autres utilisations humaines de l'eau, comme l'approvisionnement en eau des municipalités, l'activité industrielle, la production d'énergie, les besoins en eau pour le maintien des grands écosystèmes et les services récréatifs et culturels. Les prélèvements dans l'environnement à des fins industrielles, municipales et agricoles peuvent influencer sur la quantité d'eau disponible et sa qualité. Chaque secteur utilise et consomme l'eau de façons différentes, et leurs effets sur la qualité de l'eau sont différents (Corkal et Adkins, 2008; Environnement Canada, 2004). À titre d'exemple, certains grands projets tels que les barrages hydroélectriques peuvent modifier l'ensemble du bassin hydrographique avec des conséquences potentiellement négatives (p. ex. une réduction des débits d'eau disponibles pour l'irrigation, l'abaissement du niveau des eaux souterraines) ou des effets positifs (p. ex. une plus grande disponibilité d'eaux de surface et un meilleur stockage de l'eau à des fins d'irrigation) (Prowse *et al.*, 2004).

Il importe aussi de tenir compte de l'impact cumulatif sur la qualité de l'environnement aquatique (un autre aspect de l'utilisation de l'eau) des méthodes agricoles et des écoulements de restitution des municipalités et de l'industrie et des autres utilisations concurrentes, en particulier lorsque les exploitations d'élevage, les municipalités et l'industrie sont situées à proximité et lorsque les plans d'eau sont alimentés par de nombreuses sources (Environnement Canada, 2004; UNESCO, 2012). Ainsi, l'agriculture soulève actuellement des préoccupations au sujet de la qualité des eaux de surface dans

les bassins hydrographiques du lac Érié et du lac Winnipeg (rivière Saskatchewan et rivière Rouge) (CMI, 2008; Tyrchniewicz et Tyrchniewicz, 2006; EPA, 2010), tandis que les inquiétudes à propos de la quantité d'eau dans la rivière Nicola en Colombie-Britannique, en 2009, ont mené à l'imposition de limites sur l'utilisation agricole de l'eau afin que les saumons aient suffisamment d'eau pour se reproduire (Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique, 2009). En outre, des effets significatifs sur la qualité des eaux souterraines ont été documentés dans les régions agricoles situées à proximité d'Abbotsford, en Colombie-Britannique (Wassenaar *et al.*, 2006) où l'on puise abondamment dans les nappes d'eaux souterraines pour approvisionner les municipalités. À plus long terme, il importe aussi de comprendre comment les changements futurs dans les approvisionnements en eau, le climat et les méthodes de culture pourront influencer sur l'utilisation de l'eau et l'industrie agricole.

### Variations de la disponibilité et de la demande d'eau dans les régions agricoles

La disponibilité de l'eau, sa qualité et son utilisation au Canada varient dans le temps et dans l'espace. L'évolution des activités agricoles influera sur la demande d'eau utilisée en agriculture et sur le type de production agricole (cultures par opposition à élevage) et le genre de cultures pratiquées<sup>19</sup>. Pour l'agriculture irriguée et la production intensive du bétail, d'autres activités (p. ex. les besoins des écosystèmes et les utilisations industrielles, municipales et récréatives) pourraient entrer en concurrence pour l'eau disponible. Le changement climatique et la variabilité du climat influenceront aussi sur l'offre et la demande d'eau. Tous ces facteurs diffèrent d'une région à l'autre; par conséquent, la disponibilité et la demande d'eau varieront aussi largement entre les régions. La Colombie-Britannique abrite certaines des régions les plus humides (les régions côtières) et les plus sèches (certaines parties de l'intérieur) au Canada (Eilers *et al.*, 2010). À la fin de l'été, même les régions les plus humides peuvent éprouver des pénuries d'eau parce que la plus grande partie des précipitations survient durant l'hiver (AAC, 2003a). Il y a aussi une vive concurrence pour les ressources hydriques dans certaines régions agricoles. En conséquence, il y a eu certains conflits au sujet des ressources hydriques dans ces régions de la province (AAC, 2003a; de Loë et Moraru, 2004). En Ontario et au Québec, l'eau servant à l'agriculture provient en partie de plans d'eau de surface et en partie de nappes d'eaux souterraines (de Loë et Moraru, 2004); certaines régions de ces deux provinces ont été soumises à des contraintes d'approvisionnement en eau engendrées par des utilisations concurrentes et des problèmes de qualité de l'eau imputables à la production agricole (AAC, 2003a; de Loë et Moraru, 2004). À l'Île-du-Prince-Édouard, les eaux souterraines assurent la presque totalité des besoins en eau de la province (Martin *et al.*, 2000), et des préoccupations ont été soulevées au sujet de la quantité d'eau et de

---

19 Voir la figure 2.2, qui montre les différences régionales dans la production des denrées agricoles au Canada.

la quantité de l'eau (de Loë et Moraru, 2004). Dans les Prairies, les précipitations sont limitées pour l'agriculture non irriguée et montrent une forte variabilité interannuelle. La demande d'irrigation est la plus élevée en Alberta, en Colombie-Britannique et en Saskatchewan (Statistique Canada, 2011b), où les approvisionnements en eaux de surface dérivés en amont des régions agricoles constituent la source d'eau d'irrigation, tandis qu'elle est plus modeste ailleurs (Statistique Canada, 2011b), où l'on utilise principalement des sources d'eau locales (y compris les eaux souterraines).

Bien qu'il y ait toujours des problèmes locaux d'offre et de demande d'eau à des fins agricoles uniques à chaque province, le comité d'experts a observé que, globalement, les longues périodes de sécheresse ont marqué le plus souvent, et le plus profondément, la production agricole dans la région centrale et dans l'Ouest du Canada, tandis que les inondations risquent de toucher l'agriculture dans presque toutes les régions, et que les préoccupations relatives à la qualité de l'eau ont plus d'importance partout où l'on pratique l'agriculture intensive. La plus grande partie de la production agricole canadienne est confrontée à une combinaison de ces trois problèmes.

### **3.3 LES PROBLÈMES DE QUALITÉ DE L'EAU : LES NUTRIMENTS, LES PESTICIDES, LES AGENTS PATHOGÈNES ET LES AUTRES FACTEURS DE RISQUE**

La qualité des ressources en eau de surface et des eaux souterraines est le produit des interactions du climat, de la végétation et de l'hydrologie, c'est-à-dire des sols et de la géologie, et elle montre une grande variabilité dans l'espace et dans le temps. Les pressions accrues sur l'environnement provenant de l'urbanisation, de l'industrie et de l'agriculture entraînent une dégradation étendue de la qualité de l'eau, mais il faut souligner que les eaux naturelles ne correspondent pas toujours à la vision traditionnelle de la pureté de l'eau, notamment à cause des caractéristiques locales des sols (p. ex. les sols riches en sels dans les Prairies) ou de la géologie (p. ex. l'impact des dépôts naturels de sables bitumineux dans la rivière Athabaska). La contamination de l'eau dans les territoires agricoles est néanmoins une question qui soulève de sérieuses inquiétudes et elle découle d'une combinaison de pollution ponctuelle et de pollution non ponctuelle. La pollution ponctuelle a trait aux déversements spécifiques et localisés de polluants dans les eaux de surface ou dans une nappe d'eau souterraine (p. ex. les installations septiques, le ruissellement provenant des fermes, les fuites des réservoirs de carburant, ou la lixiviation et le ruissellement provenant d'un tas de fumier) (Bianchi et Harter, 2002). Les formes les plus importantes de contamination ponctuelle se trouvent probablement dans le périmètre immédiat de la ferme, des bâtiments et de la propriété familiale, et elles sont habituellement associées à des effets locaux plutôt que régionaux sur la qualité de l'eau. Le plus grand impact se situera probablement au niveau de l'approvisionnement en eau potable de la famille qui exploite la ferme et du bétail qui s'y trouve

et de nombreuses approches recommandées sont disponibles pour réduire au minimum ces effets par le biais de PGB<sup>20</sup>. Cependant, la plus grande partie de la pollution de l'eau causée par les pratiques agricoles est liée à des sources de pollution non ponctuelles (Kourakos *et al.*, 2012; Ongley, 1996), c'est-à-dire le déversement diffus de polluants dans l'environnement naturel. La contamination non ponctuelle peut s'étendre sur de grandes superficies en raison des mouvements de l'air et/ou de l'eau; l'eau provenant de la pluie, de la fonte des neiges et de l'irrigation qui s'écoule peut, en se déplaçant en surface et en pénétrant dans le sol, transporter des polluants naturels ou synthétiques et les déposer dans les bassins récepteurs des eaux de surface et des eaux souterraines (Bianchi et Harter, 2002). Même si les collecteurs pluviaux agricoles et les canalisations de restitution des eaux d'irrigation ont un seul point de déversement, ils sont généralement considérés comme des sources de pollution non ponctuelles pour ce qui est du transport des nutriments (phosphore et azote), des métaux, des agents pathogènes, des sédiments et des éléments-traces (Ongley, 1996).

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a décrit certains des effets des activités agricoles sur les eaux de surface et les eaux souterraines (Ongley, 1996) (tableau 3.1). La mauvaise qualité de l'eau pose non seulement un risque pour la santé des gens, des animaux et des écosystèmes, mais elle peut se répercuter sur l'agriculture en détériorant et, partant, en réduisant la disponibilité de l'eau pour fins d'irrigation, en abaissant le taux de prise de poids du bétail touché et en se répercutant sur la production alimentaire (Corkal et Adkins, 2008). Il y a donc un besoin croissant d'évaluer les répercussions de la qualité de l'eau sur l'agriculture, et non seulement celles de l'agriculture sur l'eau.

**Tableau 3.1**

**Effets potentiels de l'activité agricole sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines**

Activité	Effets sur les eaux de surface	Effets sur les eaux souterraines
Travail du sol/labours	Transport sédimentaire de nutriments/ pesticides; envasement des lits des rivières provoquant une perte d'habitats	Sans objet
Fertilisation	Ruissellement des nutriments entraînant une eutrophisation; croissance excessive des algues menant à une désoxygénation	Lixiviation de nitrates dans les eaux souterraines entraînant une contamination à l'échelle régionale
Épandage de fumier	Épandage du fumier sur le sol gelé et durant les périodes de ruissellements abondants, entraînant des niveaux élevés de contamination par des agents pathogènes, des métaux, le phosphore et l'azote	Contamination des eaux souterraines à l'échelle locale et régionale causée par l'azote et des agents pathogènes

*suite à la page suivante*

20 Voir, par exemple, OMAFRA, <http://www.omafra.gov.on.ca/english/environment/cfp/cfp.htm>.

Activité	Effets sur les eaux de surface	Effets sur les eaux souterraines
Épandage de pesticides	Contamination biotique; dysfonction écologique attribuable à la perte de prédateurs au sommet de la chaîne alimentaire en raison de problèmes de croissance et de fécondité; risques pour la santé attribuables à la consommation de poissons contaminés; transport aérien sur de longues distances de résidus de pesticides sous forme de poussière	Lixiviation vers les eaux souterraines ayant un impact sur la qualité de l'eau de consommation et de l'eau d'irrigation
Parcs d'engraissement/enclos d'animaux	Agents pathogènes (bactéries, virus, etc.) engendrant des risques chroniques pour la santé publique; contamination par des métaux ou des médicaments vétérinaires dans l'urine et les excréments	Lixiviation potentielle de nitrates, de métaux, de médicaments vétérinaires et d'agents pathogènes entraînant une dégradation de la qualité de l'eau au niveau local
Installations de stockage du fumier	Rejets de nutriments, d'agents pathogènes et de médicaments vétérinaires dans les eaux de surface imputables à des déversements et des trop-pleins	Rejets de nutriments, d'agents pathogènes et de médicaments vétérinaires dans les eaux de surface et les eaux souterraines en raison de fuites et d'infiltrations
Stockage de carburants sur la ferme	Contamination pétrochimique locale associée aux déversements et au ruissellement en surface provenant des réservoirs de surface	Contamination pétrochimique locale associée aux fuites des réservoirs souterrains
Champ d'épuration par égouttement	Sans objet	Lixiviation locale de nitrates, d'agents pathogènes, de métaux et de divers produits pharmaceutiques pour les humains
Ruissellement provenant de l'enclos de ferme	Rejet de nutriments, d'agents pathogènes et de médicaments vétérinaires provenant des aires d'exercice des animaux, des étables et des silos, par ruissellement en surface	Lixiviation locale du ruissellement de l'enclos de ferme transportant des nutriments, des agents pathogènes et des médicaments vétérinaires
Irrigation	Ruissellement de sels entraînant une salinisation; ruissellement d'engrais/pesticides causant des dommages à l'environnement; bioaccumulation dans les poissons comestibles; niveaux élevés d'éléments-traces (p. ex. le sélénium)	Enrichissement avec des sels et des nutriments qui compromettent la qualité de l'eau potable et de l'eau d'irrigation
Coupe à blanc	Érosion du sol entraînant une turbidité élevée des rivières et l'envasement des habitats de fonds; augmentation du volume d'eaux de ruissellement et réaction plus soudaine aux précipitations; perte potentielle de ruisseaux permanents	Perturbation du régime hydrologique, diminution de la recharge des réservoirs
Aquaculture	Rejet de pesticides et niveaux élevés de nutriments par le biais des aliments et des excréments entraînant une eutrophisation	Sans objet

(Adapté de Ongley, 1996)

L'impact sur l'environnement lié à la qualité de l'eau est souvent évalué en fonction de l'utilisation finale. À titre d'exemple, Santé Canada et Environnement Canada recommandent des concentrations maximales jugées sécuritaires pour les substances chimiques et microbiennes qui diffèrent pour la consommation humaine, la consommation animale et la santé des écosystèmes (CCME, s.d.). Dans l'environnement agricole, une suite unique de contaminants potentiels prédomine; cependant, étant donné la grande variété d'utilisateurs finals, la gamme des concentrations acceptables est également étendue.

Dans son examen, le comité d'experts a étudié la qualité de l'eau en fonction des contaminants que l'on retrouve habituellement en milieu agricole, dont l'azote et le phosphore, les pesticides et les espèces microbiennes témoins couramment utilisées pour établir la présence ou l'absence d'agents pathogènes. Plusieurs contaminants émergents, comme des produits pharmaceutiques agricoles, sont aussi pris en considération, en mettant l'accent sur les sources les plus importantes et les plus répandues de contamination non ponctuelle, ou diffuse. Le comité d'experts a jugé que, dans les limites du présent rapport, l'accent prioritaire mis sur les problèmes de qualité de l'eau en milieu agricole devrait cibler les sources non ponctuelles ou diffuses de pollution, en raison de leur étendue spatiale potentielle, de leurs effets et des défis qu'ils posent pour la politique agricole.

## Nature des effets sur la qualité de l'eau

### Les nutriments

Bien que des sols en santé renferment les nutriments essentiels à une bonne croissance des plantes, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, des suppléments sont parfois nécessaires pour maximiser la productivité économique (MacKay et Hewitt, 2010) et ils peuvent présenter des risques pour l'environnement et la qualité de l'eau. Dans certaines des économies les plus avancées, la pollution attribuable aux nutriments est considérée comme l'un des plus importants problèmes sociétaux. L'une des conséquences potentielles d'un excès de nutriments dans les systèmes d'eaux de surface est l'eutrophisation, classée par l'UNESCO parmi les plus sérieux problèmes de qualité de l'eau dans le monde (UNESCO, 2009). L'eutrophisation a trait à la croissance excessive des plantes dans une nappe d'eau attribuable aux nutriments rejetés dans une nappe d'eau ayant une faible teneur en nutriments. Cela a un impact sur l'écosystème aquatique en réduisant le contenu en oxygène dissous, ce qui peut entraîner l'extinction d'autres organismes (Environnement Canada, 2010a). Cela a aussi des conséquences pour les activités récréatives et le traitement de l'eau de consommation, et pourrait être associé aux toxines engendrées par les algues bleues-vertes, qui sont nocives pour les humains et les animaux. C'est donc là un enjeu critique pour la société et il est important de bien départager et de gérer les causes et les effets.



Les causes de l'eutrophisation sont notamment la pollution atmosphérique, les déversements d'eaux usées en régions urbaines et rurales et le ruissellement des engrais et du fumier employés en agriculture dans des eaux réceptrices. Les conséquences peuvent être graves. À titre d'exemple, en 2007, le lac Winnipeg a connu une prolifération d'algues qui, selon les estimations, s'est étendue sur une superficie de 15 000 km<sup>2</sup> et que l'on croit être la conséquence d'une quantité excessive de nutriments provenant de multiples sources (Kling *et al.*, 2011). En 2011, le lac Érié a connu la plus importante prolifération d'algues des dernières décennies durant une période extrêmement pluvieuse (NASA Earth Observatory, 2011). Plusieurs attribuent la charge en nutriments ayant produit cette prolifération d'algues à des sources diffuses de ruissellement provenant des terres agricoles qui se déversent dans le lac Érié tant du côté américain que du côté canadien. Dans les conditions de sécheresse qui ont prévalu en 2012, la prolifération d'algues sur le lac Érié n'a atteint que 10 % de la superficie de celle de 2011, ce qui montre le lien entre le climat, la formation de ruissellements et le transport des nutriments vers les lacs. Alors que l'agriculture est souvent un important contributeur, le rôle relatif de l'agriculture dans cette forme de pollution est souvent mal compris et le secteur agricole pourrait jouer un rôle important en vue d'atténuer certains de ces effets. En général, on peut donc voir que l'interface entre l'agriculture et la qualité de l'eau est complexe et soulève d'importantes questions de politique liées aux mesures pouvant être prises pour réduire au minimum les charges, à l'atténuation des effets, et, de façon générale, au rôle de l'agriculture dans la prestation de biens et de services écosystémiques.

L'intensification des activités agricoles au Canada a fortement accru le risque de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines par les nutriments. Toutefois, les données indiquent que les coûts de l'atténuation de la contamination des sols et des eaux souterraines hors de la ferme dépassent de beaucoup les coûts associés aux pratiques de gestion des nutriments sur la ferme (Lynch, 2009; MacRae *et al.*, 2007).

### **Les nitrates**

Bien qu'il soit essentiel aux cultures et habituellement étendu sous forme d'engrais inorganique ou de fumier, l'azote peut être dommageable pour les humains par le biais des produits qu'ils consomment et il peut aussi contribuer à la dégradation de la qualité des écosystèmes (notamment en favorisant l'eutrophisation) (Hatch *et al.*, 2002). Aux États-Unis, l'Environmental Protection Agency (EPA) a récemment noté que la production anthropique d'azote réactif<sup>21</sup> procurait des avantages essentiels aux gens (EPA, 2011). En fait, la survie d'une part importante de la population ne pourrait être

---

21 L'azote réactif est l'ensemble de l'azote actif sous forme biologique, chimique et radiative dans l'atmosphère et dans la biosphère terrestre. Elle comprend les formes inorganiques (c.-à-d. l'ammoniaque, l'oxyde d'azote) et les composés organiques (c.-à-d. l'urée, les protéines et les acides nucléiques) (EPA, 2011).

assurée si les engrais azotés synthétiques ne contribuaient pas à accroître de manière significative la production d'aliments. Cependant, la plupart des nitrates produits par l'activité humaine se retrouvent dans l'environnement, où ils ont souvent des effets néfastes non voulus.

L'EPA a souligné que l'agriculture utilisait davantage d'azote réactif et qu'elle était responsable d'une plus grande part des rejets d'azote réactif dans l'environnement que tout autre secteur économique (EPA, 2011). Ainsi, dans la baie de Chesapeake, l'ajout direct de 370 000 tonnes d'azote réactif annuellement par les activités agricoles cause des dommages environnementaux évalués à quelque 1,7 milliard de dollars (EPA, 2011). Des préoccupations semblables se posent en Europe. Une évaluation de l'azote réalisée en 2011 (Sutton *et al.*, 2011) a estimé que les dommages causés à l'environnement par les effets de l'azote réactif provenant de la production agricole dans l'Union européenne atteignaient entre 20 milliards et 150 milliards d'euros annuellement. En comparaison, les avantages de l'utilisation des engrais azotés pour les agriculteurs sont évalués à entre 10 milliards et 100 milliards d'euros annuellement. Manifestement, les pressions cumulatives qui pèsent sur l'environnement soulèvent des questions difficiles au sujet du rôle présent et futur de l'agriculture et de l'économie agricole. Dans la sous-surface, la lixiviation de l'azote excédentaire provenant des engrais a provoqué une contamination étendue des eaux souterraines dans des régions comme le Sud de la Colombie-Britannique (Wassenaar *et al.*, 2006) et le Sud de l'Ontario (Goss *et al.*, 1998). En fait, la National Academy of Engineering a ciblé la gestion de l'azote comme étant l'un des plus grands défis auxquels le pays doit s'attaquer (National Academy of Engineering, 2012).

Les taux d'utilisation de l'azote au Canada varient selon les types de cultures et les régions; en 2000, ils se situaient entre 25 et 225 kg/ha (FAO, 2007). À l'aide d'un modèle national, Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) a démontré que l'effet combiné des épandages d'engrais et de fumier et des cultures fixatrices d'azote avait approximativement doublé l'azote résiduel dans le sol (contenu en azote, mesuré comme étant la quantité de nitrates et de nitrites dans la couche supérieure du sol après la fin de la saison des cultures) entre 1981 et 2006 (Drury *et al.*, 2010). AAC a estimé le risque de perte d'azote dans l'environnement aquatique à partir de ces niveaux d'azote résiduel dans le sol. En 1981, 85 % des terres agricoles du Canada étaient considérées comme entrant dans les catégories de risque très faible ou faible, contre 10 % dans les catégories de risque élevé ou très élevé. En 2006, la proportion correspondant aux catégories de risque très faible ou faible avait reculé à 66 %, tandis que la proportion entrant dans les catégories de risque élevé ou très élevé avait augmenté à 17 %. La tendance générale révèle un accroissement du risque mais on observe des différences importantes entre les régions. Les Prairies présentent généralement un risque faible; en 1981, la totalité de la Saskatchewan entrait dans la catégorie très faible; mais en 2006, cette catégorie ne représentait plus que 57 % des exploitations (Drury *et al.*, 2010). En Ontario, au Québec

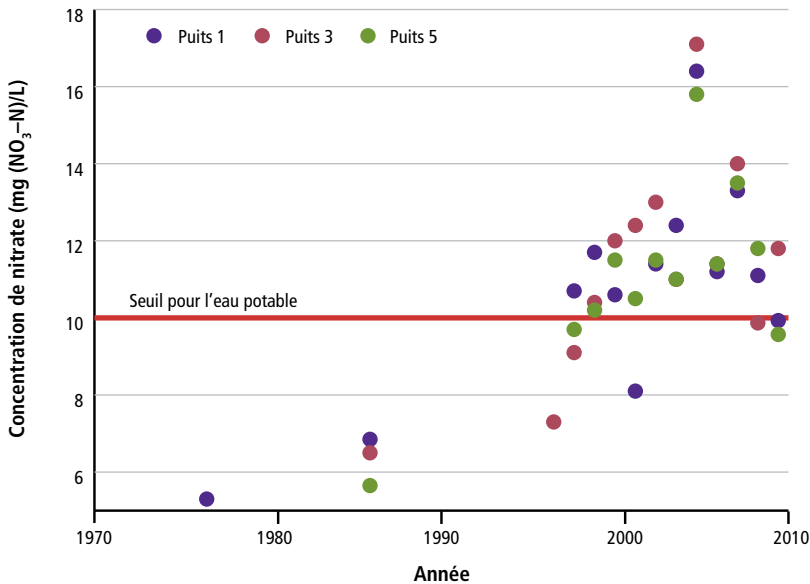
et dans les Maritimes, le risque est plus élevé; en 1981, 94 % des terres agricoles de l'Île-du-Prince-Édouard étaient considérées comme représentant un risque modéré, alors qu'en 2006, 100 % de ces terres présentaient un risque très élevé. Le comité d'experts estime que l'augmentation du risque de perte d'azote dans l'environnement aquatique en provenance des exploitations agricoles au Canada est un problème important pour la gestion des eaux agricoles qui nécessiterait un meilleur fondement scientifique pour appuyer la mise en œuvre de méthodes de gestion améliorées.

Les conséquences de cette évaluation du risque peuvent être observées dans la qualité des eaux des diverses régions du Canada. Là où les taux d'azote résiduel sont élevés, la charge en nitrates dans la nappe phréatique peu profonde est également élevée. En Nouvelle-Écosse, les concentrations de nitrates dans les eaux de drainage des sols captées par les canalisations sous le maïs cultivé étaient supérieures aux limites pour l'eau potable 44 % du temps à l'automne de 2008 (Smith et Kellman, 2011). À l'Île-du-Prince-Édouard, la lixiviation sous la rhizosphère dans les cultures de pommes de terre a produit des concentrations dépassant d'environ 50 % les normes pour l'eau potable (Jiang *et al.*, 2011). Bien que les Prairies présentent généralement un faible risque, l'application de fumier sur des sols à texture grossière peut entraîner des concentrations très élevées de nitrates dans la nappe phréatique peu profonde; en Alberta, les valeurs rapportées dans les sols irrigués pour la production céréalière classique destinée à l'ensilage atteignaient, en moyenne, plus de trois fois les normes pour l'eau potable, avec des valeurs maximales correspondant à plus de neuf fois le seuil limite (Olson *et al.*, 2009). Ces exemples témoignent du rejet généralisé d'azote dans l'environnement sous la surface des terres cultivées où l'on applique des engrais et révèlent l'étendue des concentrations attribuables à la lixiviation sous la rhizosphère qui se déplacent dans la sous-surface peu profonde vers les plans d'eau de surface. Cela a des conséquences sérieuses pour le traitement de l'eau destinée à la consommation et pour la fonctionnalité des écosystèmes.

L'analyse de la qualité de l'eau montre l'impact de ces charges élevées en nitrates dans les eaux souterraines au niveau tant régional que local. Une étude régionale portant sur plus de 1 200 puits d'eau potable sur des fermes en Ontario a révélé qu'environ 15 % de ces puits dépassaient le seuil acceptable pour l'eau potable, soit 10 mg/L de  $\text{NO}_3\text{-N}$  (Goss *et al.*, 1998). À Abbotsford, en Colombie-Britannique, une surveillance étroite de la qualité des eaux souterraines dans les puits peu profonds et profonds a montré que la contamination aux nitrates était largement répandue et qu'elle était liée à la gestion historique de l'utilisation des terres agricoles (Wassenaar *et al.*, 2006). Des concentrations de nitrates supérieures à la norme applicable de 10 mg/L (Santé Canada, 2010) ont aussi été observées ailleurs au Canada, notamment dans les puits d'approvisionnement en eau de la ville de Woodstock (Haslauer *et al.*, 2004) (voir la figure 3.4). Clairement,

la présence de concentrations élevées de nitrates dans les eaux souterraines en milieu agricole est largement répandue et représente une menace sérieuse pour les puits d'eau potable privés et municipaux au Canada.

Alors que les systèmes d'eaux de surface montrent assez rapidement les effets du ruissellement agricole, les eaux souterraines ont tendance à réagir beaucoup plus lentement; il y a un décalage important entre les rejets de nitrates provenant du système agricole et leur impact éventuel sur les eaux souterraines. Cela a des conséquences directes pour le choix du moment où des mesures doivent être prises pour lutter contre la dégradation de la qualité de l'eau. Il n'est pas irréaliste d'envisager ce problème sur un horizon de plusieurs décennies (Jackson *et al.*, 2007; Jiang et Somers, 2009). Des résultats récents publiés par Lindsey et Rupert (2012) indiquent que la fréquence des concentrations élevées de nitrates dans les puits d'eau est demeurée à des niveaux similaires ou, dans bien des cas, a augmenté dans différentes régions des États-Unis au cours de la dernière décennie, comme il ressort d'une série d'analyses de la qualité de l'eau des puits. Les effets



Source des données : Haslauer *et al.*, 2004

Figure 3.4

### Concentrations de nitrate dans les puits d'eau municipaux de la ville de Woodstock en Ontario

Cette figure montre l'augmentation progressive des concentrations de nitrate dans les puits d'eau municipaux à Woodstock, en Ontario, sur 40 ans, révélant les effets cumulatifs des charges en nutriments dans les territoires agricoles environnants au cours des périodes antérieures.

cumulatifs de la fertilisation excessive ne se sont pas encore complètement matérialisés dans les eaux souterraines, mais les données incitent à penser que les concentrations de nitrates pourraient continuer à augmenter dans l'avenir prévisible.

Bien que ces cas fournissent des exemples de la dégradation de la qualité des eaux souterraines au Canada, il y a un manque de données et de renseignements sur l'étendue et la portée des effets à l'échelle nationale. Cette lacune limite l'élaboration et le ciblage de stratégies efficaces pour assurer une gestion durable de l'eau, y compris l'application de PGB appropriées (examinées au chapitre 4).

### **Le phosphore**

Le phosphore, un autre nutriment important pour la croissance des plantes et des animaux, est aussi appliqué sous forme de fumier ou d'engrais à base de phosphate minéral (Leinweber *et al.*, 2002). Cependant, l'épandage de phosphore sur les terres peut entraîner une augmentation progressive des niveaux de phosphore dans le sol et un risque accru d'écoulement vers les nappes d'eau. En raison de ses caractéristiques de faible solubilité et de sorption élevée, le phosphore présente généralement un risque plus élevé pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines. Dans plusieurs, sinon la grande majorité des systèmes d'eau douce, le phosphore est un nutriment d'importance critique pour la productivité. Par conséquent, le mouvement du phosphore dans les eaux de surface peut entraîner une eutrophisation, comme nous l'avons indiqué précédemment. De plus, des niveaux élevés de phosphore ont eu des répercussions sur l'utilisation de l'eau à des fins récréatives, la qualité et le traitement de l'eau potable, et la santé des animaux et des hommes (Leinweber *et al.*, 2002).

Un rapport d'Environnement Canada (2011d) portant sur les nutriments d'origine agricole fait état du niveau élevé d'inquiétude du public au sujet du phosphore. Des données récentes semblent indiquer que jusqu'à 32 % des sites de surveillance de la qualité des eaux de surface durant la période 2005-2007 montraient des valeurs supérieures aux lignes directrices sur la qualité de l'eau pour le phosphore plus de la moitié du temps. Tel que noté plus haut, le phosphore pose essentiellement un problème pour la qualité des eaux de surface. Il a été associé à de graves proliférations d'algues dans le lac Winnipeg, le lac Simcoe et d'autres lacs de l'Est du Canada (Environnement Canada, 2011d) et il suscite des préoccupations croissantes dans des régions comme celle du lac Diefenbaker (Hecker *et al.*, 2012). Les profils spatiaux de présence du phosphore varient largement entre les différentes régions du pays, les concentrations observées dans les rivières augmentant habituellement à mesure que l'on procède en aval à cause de l'accumulation des charges anthropiques. Des concentrations plus élevées de phosphore ont été signalées dans les Prairies, en amont du lac Winnipeg, tandis que les concentrations les plus faibles ont été enregistrées dans les eaux en amont des rivières du bassin hydrographique du Pacifique et dans la partie supérieure des Grands

Lacs (Environnement Canada, 2011d). La mobilité et le mouvement du phosphore sur les terres agricoles sont complexes et demeurent mal compris. Une des principales causes de cet état de fait est que le réseau de surveillance permettant de suivre le déplacement des nutriments, dont le phosphore, dans le cycle hydrologique a une densité insuffisante pour permettre de contextualiser les nombreux facteurs humains et naturels qui interviennent à certains endroits. Il est donc difficile de faire une évaluation adéquate du problème ou de suggérer quels résultats pourraient être obtenus grâce à une amélioration des pratiques de gestion agricole (Environnement Canada, 2011d). D'autres détails sur les besoins en matière de surveillance se trouvent à la section 3.5.

Les taux d'utilisation du phosphore au Canada ont augmenté avec le temps (Chambers *et al.*, 2001). Les taux d'épandage dépendent du type de culture et ils variaient entre 26 et 130 kg/ha en 2000; la culture des pommes de terre est celle qui, de loin, requiert les niveaux les plus élevés de fertilisation (FAO, 2007). Des niveaux élevés de phosphore ont été enregistrés dans les eaux de surface du bassin du ruisseau South Tobacco au Manitoba (Li *et al.*, 2011). On a récemment observé que les niveaux de phosphore dans sept des huit rivières du Québec situées à proximité de zones d'élevage étaient jusqu'à deux fois plus élevés que les lignes directrices pour la protection des cours d'eau contre l'eutrophisation (Patoine *et al.*, 2012). AAC a noté que le contenu en phosphore des sols avait augmenté depuis 1976, alors que l'intensification de l'agriculture avait donné lieu à des applications de phosphore excédant la capacité d'absorption des cultures (van Bochove *et al.*, 2010). Cela a produit des concentrations très élevées de phosphore dans certaines régions de la Colombie-Britannique, de l'Alberta, de l'Ontario, du Québec, du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse. À l'aide d'un modèle d'évaluation du risque, AAC a estimé que 98 % du Canada présentait un risque faible ou très faible de rejet de phosphore dans les eaux de surface en 1981; en 2006, toutefois, la situation avait changé : 75 % du territoire présentait un risque faible ou très faible, 19 % un risque modéré et 7 % un risque élevé ou très élevé (van Bochove *et al.*, 2010). Dans l'Est du Canada, le ruissellement de surface et l'érosion hydrographique des sols sont les principaux facteurs de risque de contamination des eaux de surface par le phosphore, tandis que le ruissellement de surface est le principal facteur contributif dans l'Ouest canadien (van Bochove *et al.*, 2010).

### Les pesticides

Les pesticides – y compris les fongicides, les herbicides, les insecticides et les bactéricides – sont largement utilisés dans les milieux urbains et ruraux pour contrôler les mauvaises herbes, les parasites et les maladies (Cessna *et al.*, 2010; Environnement Canada, 2011b). L'agriculture est le secteur d'activité qui, de loin, utilise les plus grandes quantités de pesticides (Environnement Canada, 2011b). Selon AAC, plus de 35 millions de kilogrammes de pesticides ont été appliqués au Canada en 2006 (Cessna *et al.*, 2010). Les provinces des Prairies sont à l'origine de 84 % de l'utilisation des pesticides,

la Saskatchewan représentant près de la moitié du total. Mais c'est au Nouveau-Brunswick et à l'Île-du-Prince-Édouard que l'on retrouve la plus forte utilisation de pesticides par hectare de terres cultivées. Les pesticides appliqués au pays sont des herbicides (94 %), des fongicides (4 %) et des insecticides (2 %), mais il y a une variation importante dans l'utilisation de pesticides/fongicides entre les diverses régions du pays. Ainsi, les herbicides comptent pour plus de 80 % de l'utilisation totale de pesticides en Colombie-Britannique, dans les Prairies, en Ontario et au Québec, tandis que dans certaines provinces Maritimes plus de 50 % des pesticides employés sont des fongicides (Cessna *et al.*, 2010).

Bien que l'utilisation de pesticides engendre des avantages importants en haussant les rendements des cultures, elle pourrait aussi contribuer à la dégradation de l'environnement. Les pesticides se retrouvent dans l'environnement par voie atmosphérique et par ruissellement et lixiviation en provenance des terres agricoles, risquant de contaminer les eaux de surface et les sources souterraines (Cessna *et al.*, 2010). Des pesticides ont été détectés dans les eaux de surface partout au Canada, ainsi que dans 2 à 40 % des puits d'eau analysés en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan, en Ontario, en Nouvelle-Écosse et à l'Île-du-Prince-Édouard (Cessna *et al.*, 2010). Étant donné l'importance des épandages de pesticides dans les Prairies, il n'est pas étonnant qu'une étude menée en 2012 ait révélé la présence de multiples pesticides dans tous les réservoirs d'eau potable analysés (Glozier *et al.*, 2012). Par ailleurs, dans une vaste étude portant sur les puits d'eau potable de plus de 1 200 exploitations agricoles en Ontario, Goss *et al.*, (1998) ont indiqué n'avoir détecté que de faibles quantités de toute une série de pesticides courants. Il faut noter qu'en raison de l'efficacité et de la réglementation des pesticides, ceux qui sont utilisés aujourd'hui ont tendance à être beaucoup plus sélectifs et moins toxiques que les variantes passées et requièrent de plus faibles taux d'épandage (Cessna *et al.*, 2010). Le programme Production alimentaire 2002 de l'Ontario a démontré qu'une réduction de l'utilisation des pesticides n'a pas nécessairement d'effet défavorable sur la productivité. Dans le cadre de ce programme, l'utilisation de pesticides a diminué de 38,5 % entre 1983 et 1998, alors que le rendement moyen à l'hectare augmentait de 14,5 % durant la même période (Gallivan *et al.*, 2001).

AAC a évalué le risque pour la qualité de l'eau posé par l'utilisation de pesticides sur les terres agricoles entre 1981 et 2006. En 1981, 98 % des terres étaient considérées comme ayant un risque faible ou très faible, tandis que le reste, soit 2 %, présentaient un risque variant de modéré à très élevé. En 2006, la superficie représentant un risque faible ou très faible avait reculé à 86 %, alors que 13 % de la superficie agricole entraient dans les catégories de risque variant de modéré à très élevé. Ce changement a été associé à l'augmentation croissante de l'utilisation des pesticides. En dépit des préoccupations au sujet des effets des pesticides sur la santé humaine et l'environnement, des lignes directrices sur la qualité de l'eau n'ont pas été établies pour la plupart des pesticides

utilisés en agriculture au Canada (Cessna *et al.*, 2010). Bien que les données portant sur l'ensemble des régions du pays indiquent que, de façon générale, les niveaux détectés se situent sous les valeurs limites canadiennes *là où il en existe*, il importe de souligner le degré élevé de variabilité dans les normes internationales. Dans certains cas, les normes canadiennes sont moins rigoureuses que celles adoptées ailleurs. À titre d'exemple, la concentration limite de 2,4-D dans l'eau potable au Canada est de 0,1 mg/L, tandis que la norme employée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Australie est de 0,03 mg/L et que celle appliquée en Europe n'est que de 0,0001 mg/L (Gouvernement australien, 2011a; UE, 1998; Santé Canada, 2010; OMS, 2011). En outre, il n'y a pas de lignes directrices au Canada pour la concentration de pesticides dans les mélanges de produits chimiques, contrairement aux lignes directrices sur la qualité de l'eau en vigueur dans l'Union européenne (Cessna *et al.*, 2010).

### Les agents pathogènes

Les agents pathogènes, c'est-à-dire les microorganismes qui causent des infections et des maladies, peuvent être des virus, des protozoaires ou des bactéries et sont souvent présents dans les excréments des animaux et des humains. Les principales sources de contamination de l'eau par des agents pathogènes entériques sont les eaux usées, les dépôts d'excréments des animaux et des oiseaux qui ont visité les zones contaminées, ainsi que la lixiviation du fumier sur les terres agricoles (Goss et Richards, 2008), cette dernière source étant celle sur laquelle se concentre principalement la présente analyse.

Les maladies infectieuses d'origine hydrique sont une cause importante de morbidité. Une fois ingérées, plusieurs espèces pathogènes telles que la *Giardia* et le *Cryptosporidium* peuvent provoquer immédiatement des maux gastro-intestinaux graves et soulèvent une préoccupation considérable en tant que contaminant potentiel. À titre d'exemple, l'éclosion survenue à Walkerton, en Ontario, qui a causé sept décès et plus de 2 000 cas graves de maladie en 2000 provenait des agents pathogènes *E. coli* 057:H7 et *C. jejuni* présents dans les eaux de ruissellement d'une ferme d'élevage (O'Connor, 2002). La présence et la source de la plupart des agents pathogènes en milieu agricole peuvent être hautement variables et de nature complexe. Ainsi, la *Giardia* est souvent présente dans les selles des humains, des castors, des rats musqués et des chiens, tandis que le *Cryptosporidium* est souvent associé au fumier de bovins (Santé Canada, 2009a). Les coliformes sont une vaste catégorie de bactéries que l'on retrouve dans l'environnement et ils peuvent provenir de sources humaines ou animales (Boubetra *et al.*, 2011). Leur détection dans l'eau de consommation est souvent considérée comme un indicateur de la présence potentielle d'autres espèces pathogènes plus nocives, en raison de leur protocole d'analyse relativement simple.



Bien qu'il n'y ait pas de surveillance nationale des agents pathogènes au Canada, une étude menée en 2012 dans quatre grands bassins hydrographiques où l'on pratique l'agriculture intensive au pays a révélé la présence d'agents pathogènes d'origine hydrique dans 80 % des échantillons d'eau de surface recueillis (Edge *et al.*, 2012). Des études provinciales antérieures avaient aussi fait ressortir des indices microbiens dans les puits ruraux. À titre d'exemple, dans l'étude portant sur plus de 1 200 puits ruraux en Ontario, environ 40 % des puits examinés contenaient au moins une des espèces ciblées, ce qui incite à penser que la contamination microbienne est assez répandue dans les eaux souterraines peu profondes des régions agricoles (Goss *et al.*, 1998).

Les recherches indiquent que le taux, la méthode et la période d'épandage du fumier et son incorporation au sol peuvent avoir un impact significatif sur la présence d'agents pathogènes dans les eaux de surface avoisinantes et la perte de nutriments (MacKay et Hewitt, 2010). Le moment de l'année où le fumier est étendu influe aussi sur l'état de l'environnement; l'épandage durant l'hiver (lorsque la production de fumier dépasse la capacité de stockage) est réglementé dans plusieurs provinces car il comporte un très haut risque de nuisance olfactive et de contamination de l'eau (MacKay et Hewitt, 2010). Hors de l'organisme hôte, les agents pathogènes entériques perdent progressivement de leur viabilité. Cela donne une assise importante à l'élaboration de stratégies efficaces de contrôle, notamment des maladies infectieuses entériques associées à l'épandage dans les champs de boues d'eaux usées urbaines, en appliquant de multiples barrières (p. ex. des restrictions portant sur le traitement, l'utilisation des terres, la plantation, les délais d'attente et les récoltes) (Lang *et al.*, 2007; Nicholson *et al.*, 2005; Rogers et Smith, 2007).

L'état et la présence d'espèces pathogènes dans les eaux souterraines sont très mal compris et constituent une piste de recherche active. Les données semblent indiquer que la fréquence et la concentration des agents pathogènes dans les eaux de surface et les eaux souterraines ont une corrélation avec certains événements hydrologiques tels que les précipitations intenses ou les périodes de fonte des neiges, ainsi qu'avec les propriétés du sol près de la surface (Cey *et al.*, 2009). Cependant, les connaissances sont très limitées sur la nature de ces corrélations ou le comportement des agents pathogènes d'origine hydrique en lien avec de tels événements. Considérant leur impact potentiel sur la santé humaine, des recherches supplémentaires sur la présence de microbes dans les eaux de surface et les eaux souterraines en milieu agricole revêtent une priorité élevée.

### Les médicaments vétérinaires

Les médicaments vétérinaires sont utilisés à la fois pour traiter et prévenir les maladies chez les animaux, et les éleveurs de bétail utilisent couramment des suppléments renfermant tout un éventail de produits pharmaceutiques dans l'alimentation des animaux. Bien que les effets environnementaux de ces produits constituent une discipline scientifique émergente, des études internationales et canadiennes ont permis de détecter leur présence

dans le sol et l'eau (voir, par exemple, Lissemore *et al.*, 2006). Une vaste étude réalisée en 2003 a révélé que pour la plupart des médicaments vétérinaires, les concentrations au-delà desquelles nous savons qu'il y a des effets sur les organismes aquatiques et terrestres sont sensiblement plus élevées que celles observées dans l'environnement (Boxall *et al.*, 2003). Néanmoins, il y a certains exemples où les concentrations mesurées sont supérieures à celles à partir desquelles il y a des effets connus. En outre, il existe peu de données permettant d'évaluer l'impact des sous-produits de dégradation, tandis que les données qui permettraient de déceler des effets plus subtils à long terme sont limitées. Parmi les préoccupations qui se posent, il y a les liens possibles entre l'utilisation de produits antibactériens et l'apparition d'une résistance antibactérienne qui pourrait se transmettre des animaux aux humains par des voies environnementales, y compris les sols et l'eau. Des études ont permis d'observer que l'utilisation de tels produits chimiques provoque des changements dans les populations microbiennes, y compris une augmentation des bactéries résistantes aux produits antibactériens dans le sol (Baran *et al.*, 2011; Boxall *et al.*, 2003). La présence et l'état de cette famille complexe de nouveaux contaminants sont encore très mal compris et documentés et ils constituent un domaine de recherche prioritaire.

### **3.4 LE BESOIN D'ÉCLAIRER LA GESTION DE L'EAU À L'AIDE DE RENSEIGNEMENTS SUR LA QUANTITÉ, L'UTILISATION ET LA QUALITÉ DE L'EAU**

Les profils de demande d'eau dans le secteur agricole varient dans le temps. La demande pourrait augmenter fortement dans l'avenir selon l'évolution des marchés d'exportation et les décisions concernant les cultures au pays. L'irrigation a globalement doublé au Canada entre 1950 et 2001, mais la progression n'a pas été continue (TRNEE, 2010a). Selon des estimations, 3 millions d'hectares supplémentaires de terres pourraient être irrigués (TRNEE, 2010a), soit plus de cinq fois la superficie d'environ 530 000 hectares qui étaient irrigués en 2010 (Statistique Canada, 2011a). Cependant, il y a des sérieuses contraintes à une telle expansion. Parmi celles-ci, il y a les coûts d'infrastructure élevés, l'incertitude au sujet de l'accès à des sources d'eau convenables, les qualités variables des sols et de la topographie aux fins de l'irrigation, l'hésitation à adopter l'irrigation dans le milieu agricole et l'impact négatif sur l'environnement d'une telle expansion de l'irrigation (Corkal et Adkins, 2008).

Si le Canada aide à combler la demande émergente pour les produits de la viande dans les économies en développement, l'utilisation de l'eau en agriculture pourrait aussi augmenter. De nombreux agriculteurs sont intéressés à cultiver des variétés de plus grande valeur ou destinées à la production de biocarburants, ou à élever du bétail, des activités qui consomment toutes relativement plus d'eau (TRNEE, 2010a). La possibilité

de réaliser une telle transformation dans la production animale et les cultures est fonction de la disponibilité et de la qualité de l'eau, des conditions climatiques et des contraintes d'infrastructure (Corkal et Adkins, 2008).

La consommation accrue d'eau en agriculture complique la gestion de l'eau et requiert par conséquent plus d'information afin de gérer adéquatement la ressource. Il y a déjà des exemples au Canada où les gestionnaires responsables de l'eau ont eu un accès insuffisant à des mesures et à des prévisions des flux en amont dans les réservoirs et à des données sur les caractéristiques hydrographiques des cours d'eau en aval des réservoirs. Par conséquent, ils n'ont pas été en mesure de répondre aux demandes concurrentes d'eau pour l'agriculture et le contrôle des crues (Centre for Hydrology, 2012). La possibilité de satisfaire des demandes concurrentes pour l'approvisionnement en eau et le contrôle des crues devient plus incertaine lorsque les apports annuels dans les réservoirs diminuent mais que les débits de pointe ne baissent pas, comme il est arrivé dans le bassin de la rivière Saskatchewan Sud au cours des 50 dernières années. Le comité d'experts soutient que de meilleurs renseignements sur la quantité et l'utilisation des eaux de surface et des eaux souterraines sont essentiels pour éclairer les décisions des responsables des politiques aux niveaux fédéral et provincial, des gestionnaires de l'eau, des producteurs agricoles et des autres intervenants.

La qualité des ressources hydriques est évaluée en fonction de paramètres physiques, chimiques ou biologiques, et elle varie considérablement sous l'effet des processus naturels et des activités humaines. Évaluer la qualité de l'eau pour l'ensemble des régions agricoles au Canada est une tâche à la fois redoutable et complexe. L'analyse de certains paramètres peut être coûteuse et demander beaucoup de temps; de plus, les superficies en cause sont importantes et physiquement diversifiées, les méthodes d'utilisation des terres varient entre les régions, et les systèmes de surveillance et les protocoles d'échantillonnage ne sont pas uniformisés d'une sphère de compétence à l'autre (CAC, 2009; CCME, 2006; Environnement Canada, 2012c). De l'avis du comité d'experts, ce sont certaines des raisons pour lesquelles les séries de données nationales au Canada sont généralement très limitées en termes tant de réseaux spatiaux disponibles que de résolution temporelle de l'échantillonnage. Cependant, la surveillance de la qualité de l'eau est un autre intrant essentiel à une prise de décision efficace, et les responsables gouvernementaux et les autres intervenants ont besoin de renseignements scientifiques précis et crédibles afin de cerner les arbitrages optimaux, de forger des consensus et de prendre des mesures efficaces.

Étant donné que l'eau douce a une importance capitale pour la grande majorité des activités économiques – et non uniquement pour l'agriculture – une bonne compréhension de l'état et des tendances à long terme de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau est également indispensable à notre prospérité future (Bureau du vérificateur général

du Canada, 2010). La quantité d'eau et la qualité de l'eau doivent être mesurées à des échelles spatiales et temporelles appropriées pour appuyer une gestion durable de l'eau en agriculture, à la fois comme mesures directes facilitant la prise de décision et comme intrant dans des modèles informatisés de prévision de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau à divers endroits et durant diverses périodes lorsque celles-ci ne peuvent être mesurées directement.

### Le rôle de la surveillance et de l'évaluation de l'eau

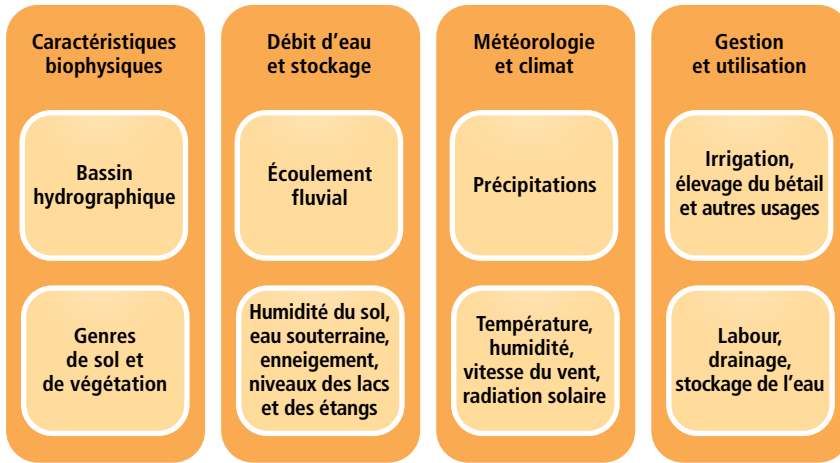
La surveillance environnementale fait habituellement référence aux diverses méthodes employées pour prélever des échantillons d'eau, d'air et de sol et mesurer d'autres aspects du milieu naturel (Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011). Il est important de reconnaître qu'il y a de multiples raisons à l'origine de cette surveillance, avec des besoins différents sur le plan de la conception des réseaux de surveillance. Les données qui en ressortent peuvent servir à évaluer les conditions environnementales actuelles, à détecter des changements ou des tendances, à appuyer la gestion opérationnelle (p. ex. la gestion des ressources hydriques ou la prévision des crues) et/ou à évaluer l'impact potentiel des mesures d'atténuation employées dans ces situations (p. ex. les effets des PGB en agriculture) (Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011; CCME, 2011; Lovett *et al.*, 2007). La surveillance de l'eau joue donc un rôle essentiel pour a) évaluer avec précision la qualité des ressources hydriques partout au Canada, lesquelles subissent les pressions engendrées par le ruissellement et les eaux usées des zones urbaines, l'agriculture, les activités industrielles, l'expansion démographique, le développement économique, le changement climatique et une répartition inéquitable de la ressource (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010); b) appuyer la gestion opérationnelle des ressources hydriques du Canada; c) évaluer l'efficacité des interventions. Des renseignements sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau sont également essentiels pour détecter en temps opportun les menaces émergentes, alors que l'incapacité de le faire pourrait nécessiter des efforts de remédiation plus coûteux (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Afin de pouvoir identifier ces menaces, toutefois, des données de surveillance à diverses échelles spatiales doivent être évaluées pour établir les liens de cause à effet et, de façon générale, il importe de reconnaître que la surveillance et l'évaluation font partie d'un processus itératif – à mesure que de nouveaux renseignements sont disponibles ou que de nouveaux besoins surgissent, les réseaux de surveillance doivent être adaptés (Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011). Ces analyses doivent aussi être publiées et diffusées pour favoriser une meilleure compréhension des conditions actuelles, des tendances et des risques potentiels, et pour appuyer l'élaboration de politiques et une gestion environnementale efficaces (Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011; Lovett *et al.*, 2007).

### 3.5 L'ÉTAT DE LA SURVEILLANCE DE LA QUANTITÉ D'EAU ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU AU CANADA

#### Renseignements sur l'eau aux fins de l'agriculture

Le comité d'experts juge que l'accès à des mesures et à des données de simulation adéquates sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau est particulièrement important pour assurer une bonne gestion de l'eau en agriculture, qui dépend de la quantité de précipitations naturelles (pluie et neige) et du moment où elles surviennent et, dans le cas de l'irrigation et d'autres formes d'utilisation, de la manipulation possible des débits des cours d'eau et du stockage des eaux de surface et des eaux souterraines dans les bassins hydrographiques. En outre, les modèles de simulation des bassins hydrographiques requièrent des renseignements supplémentaires pour évaluer les débits, le stockage et la qualité de l'eau. Il faut donc avoir accès à un large éventail de données de surveillance sur les caractéristiques biophysiques des bassins hydrographiques, les flux et le stockage de l'eau et de l'énergie, le climat, la météorologie, et la gestion, l'utilisation et la consommation de l'eau (voir la figure 3.5). Dans le passé, de telles données provenaient d'observations sur le terrain, mais des plateformes optiques et à rayonnement infrarouge utilisant des satellites ont permis de produire des renseignements sur l'utilisation des terres et l'évapotranspiration depuis environ 1970. De plus en plus, des données provenant de systèmes de télédétection par satellite et aéronef sont disponibles pour appuyer la surveillance et la modélisation des systèmes hydriques. Entre autres exemples, il y a l'utilisation des mesures LiDAR (détection et télémétrie par ondes lumineuses), qui fournissent des données numériques d'élévation à résolution élevée (offrant une étape transitoire vers la caractérisation des bassins de drainage des Prairies) et des mesures des changements de gravité prises par satellite (p. ex. GRACE), à partir desquelles il est possible de déduire les équilibres hydriques. Les satellites à micro-ondes fournissent de nouveaux renseignements sur l'humidité près de la surface du sol, l'équivalent en eau de la neige et les superficies inondées. Les mesures de la neige sont abordées plus en détail dans l'examen du bassin de la rivière Saskatchewan. Il y a un important potentiel d'expansion de la télédétection par aéronef avec l'utilisation des drones, qui ont l'avantage de pouvoir fournir des mesures sous les nuages et sont moins coûteux à opérer que les avions.

Les caractéristiques biophysiques pertinentes des bassins fluviaux sont le réseau de canaux de drainage du bassin fluvial, les superficies contribuant au ruissellement, le stockage dans les dépressions, la topographie, la texture du sol et le couvert végétal, y compris les profils de culture et de récolte. Ces renseignements servent à faire des simulations des bassins hydrographiques pour estimer la quantité d'eau disponible dans les bassins non jaugés pour l'irrigation et l'élevage, les niveaux d'humidité dans le sol, la demande d'évapotranspiration et d'irrigation et les besoins de drainage.



Source des données : Gracieuseté de John Pomeroy

Figure 3.5

### Renseignements requis pour la gestion de l'eau agricole au Canada

Cette figure montre les renseignements requis pour la gestion de l'eau agricole au Canada. À noter qu'il ne s'agit que d'un des ensembles de renseignements nécessaires à la surveillance de l'eau. D'autres besoins en renseignements sont mis en évidence dans l'aperçu schématisé du cadre conceptuel présenté à la figure 2.1 et sont discutés tout au long du rapport.

Les débits des cours d'eau, en amont et en aval de la zone de gestion de l'eau, ont aussi une importance cruciale, tout comme les flux d'énergie, qui ont une incidence sur la fonte des neiges, le gel et le dégel du sol et l'évapotranspiration. Les renseignements sur le stockage de l'eau en termes d'humidité dans le sol, du niveau des nappes d'eaux souterraines, du niveau des lacs et des étangs, de l'équivalent en eau de la neige accumulée et de la masse des glaciers sont aussi utilisés pour calculer la disponibilité de l'eau dans le temps aux fins de l'irrigation et de l'élevage, le potentiel de ruissellement, les besoins de drainage, la période propice pour le travail du sol et le choix de cultures adéquates. L'intensité et la durée des précipitations (sous forme de pluie ou de neige), la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent et la radiation solaire sont d'importants paramètres des conditions météorologiques immédiates et du climat à plus long terme dans le calcul de la disponibilité de l'eau et de la neige et de l'évapotranspiration, qui entrent dans les décisions concernant la plantation et les récoltes. Les renseignements sur les événements météorologiques graves (tornades, tempêtes de grêle, pluies diluviennes, fortes bourrasques de neige et sécheresses) sont nécessaires pour évaluer le besoin de prendre de toute urgence des mesures de drainage ou de stockage de l'eau pour protéger les terres agricoles et l'infrastructure rurale, ainsi que pour la gestion des réservoirs, les décisions concernant la plantation et les récoltes et l'assurance-récolte. Enfin, il importe

de faire une distinction entre l'utilisation consommatrice de l'eau et les prélèvements totaux d'eau afin de déterminer la disponibilité totale de la ressource, et la qualité globale de l'eau doit être connue et évaluée en fonction des lignes directrices applicables avant son utilisation en milieu agricole.

### Programmes de surveillance des eaux de surface au Canada

La responsabilité de la gestion de l'eau douce au Canada est partagée entre le gouvernement fédéral, les provinces et d'autres intervenants (voir le chapitre 6). Depuis sa création au début des années 1970, Environnement Canada est l'organisme fédéral responsable de la collecte, de l'interprétation et de la diffusion de données et de renseignements sur l'eau (Environnement Canada, 2012b). Le gouvernement administre deux grands programmes pour les eaux de surface : le Programme hydrométrique national, qui porte sur la quantité d'eau, et le Programme de surveillance de la qualité des eaux douces (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Un examen détaillé de ces programmes et de la politique fédérale de l'eau a été commandité par Environnement Canada en 1984; cet examen a donné lieu à ce qu'on appelle le Rapport Pearse et à l'adoption, en 1987, d'une politique fédérale de l'eau visant à améliorer la gestion de l'eau au Canada (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010).

#### Le Programme hydrométrique national

Le Programme hydrométrique national, géré par le Programme de surveillance météorologique et environnementale du Service météorologique du Canada, recueille, interprète et distribue des données et des informations sur la quantité d'eau de surface, recueillies dans 2 107 stations de mesure du niveau et/ou du débit d'eau, ainsi que des données acquises par le secteur privé (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010; Environnement Canada, 2010e). Le programme prévoit un partage des responsabilités et des coûts entre Environnement Canada et d'autres ministères fédéraux, les provinces et les territoires, et le secteur privé (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Les renseignements recueillis dans le cadre de ce programme sont utilisés à des fins telles que :

- la planification, la conception et l'exploitation d'infrastructures de production d'énergie hydroélectrique, d'irrigation et de production industrielle;
- la recherche sur les écosystèmes aquatiques, le changement climatique et les effets sur l'environnement;
- la répartition de l'eau et les décisions de gestion des offices des eaux (comme la Commission des eaux des provinces des Prairies) et la Commission mixte internationale;
- l'application de la réglementation des divers gouvernements.

Les renseignements du programme de surveillance sont diffusés dans une base de données nationale; le programme a aussi établi des procédures d'assurance de la qualité au niveau national pour valider ses données, y compris une vérification visant à faire

en sorte que les responsables du programme et le personnel affecté à la collecte des données appliquent des méthodes nationales. Environnement Canada a fixé des objectifs de rendement mesurables pour les renseignements provenant de la surveillance de la quantité d'eau qui ont aidé à définir des attentes relatives à la qualité des données et leur diffusion rapide dans le cadre du Programme hydrométrique national; cependant, le besoin de définir et de mettre en œuvre des plans d'action pour poursuivre les efforts d'amélioration demeure (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010).

### **Le Programme de surveillance de la qualité des eaux douces**

Le Programme de surveillance de la qualité des eaux douces évalue et fait rapport sur les caractéristiques des ressources en eaux de surface du Canada afin d'aider à mieux comprendre l'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes aquatiques. Le programme gère au total 456 stations de surveillance de la qualité de l'eau à long terme (Environnement Canada, 2011e) (outre un certain nombre de stations de surveillance et d'analyse biologique à court terme) (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Ces stations recueillent des renseignements aux fins suivantes :

- déterminer les conditions fondamentales de la qualité de l'eau;
- vérifier la conformité aux lignes directrices et aux lois en matière d'environnement;
- évaluer les réponses aux mesures correctives;
- détecter les problèmes et les menaces émergents;
- gérer les risques.

Le Programme de surveillance de la qualité des eaux douces a joué un rôle clé dans l'élaboration de l'indicateur de la qualité de l'eau pour l'initiative des Indicateurs canadiens de la durabilité de l'environnement (ICDE) (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Le gouvernement fédéral a lancé cette initiative en 2004 en vue d'élaborer un ensemble d'indicateurs de base de l'environnement et du développement durable. Tel qu'expliqué dans le rapport du Bureau du vérificateur général du Canada (2010), l'indicateur ICDE de la qualité de l'eau « sert à obtenir, grâce à des sites de surveillance sélectionnés au Canada, une mesure globale de la capacité des plans d'eau de maintenir la vie aquatique ». Le Programme de surveillance de la qualité des eaux douces fournit des données pour cet indicateur, « [C]onjointement avec 21 autres programmes de surveillance de la qualité de l'eau administrés par divers ordres de gouvernement et diverses régies des eaux », partout au pays (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010).

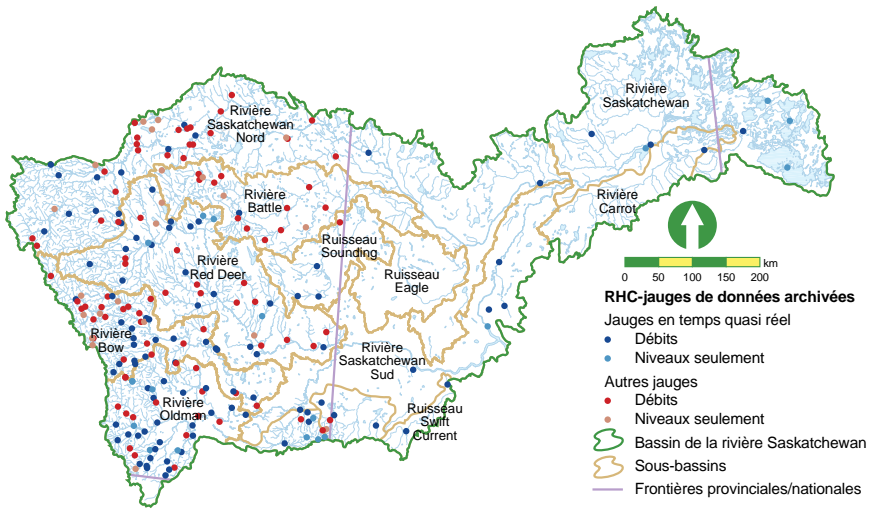


Contrairement au Programme hydrométrique national, le Programme de surveillance de la qualité des eaux douces ne compte que quatre ententes fédérales/provinciales appliquées activement. En outre, il n'a pas conclu d'accord de surveillance avec l'un ou l'autre des territoires, bien qu'il ait convenu de certains arrangements locaux pour surveiller la qualité de l'eau (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Ce manque d'uniformité dans les modalités de surveillance de la qualité de l'eau au pays entrave la capacité d'exploiter les avantages associés aux accords de surveillance officiels, y compris le partage des coûts, l'échange d'information et d'expertise, et la possibilité de comparer des données fiables et accessibles à la grandeur du pays (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010; CCME, 2006). Le Programme de surveillance de la qualité des eaux douces ne possède pas non plus de base de données nationale et ni de procédures uniformes pour garantir que la qualité des données provenant de ses bases de données régionales soit suffisante aux fins visées. En outre, « [l]e suivi ou la diffusion des écarts par rapport aux seuils de la qualité de l'eau n'est pas fait systématiquement dans le cadre du Programme de surveillance de la qualité des eaux douces » au Canada (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Il y a donc un besoin pressant d'établir une procédure pour assurer la publication des écarts par rapport aux seuils de qualité de l'eau afin que des mesures puissent être prises en temps opportun pour maintenir la qualité de l'eau et/ou la santé du milieu aquatique, ou atténuer les problèmes qui se posent (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). En plus d'un échantillonnage géographique limité, une préoccupation particulière liée à la surveillance de la qualité de l'eau est que, de façon générale, les observations dans le réseau national se font à une fréquence mensuelle, dans le meilleur des cas. Le comité d'experts tient à rappeler que, dans le cas de plusieurs contaminants, cela est nettement insatisfaisant pour enregistrer les charges annuelles et les valeurs extrêmes. Cependant, de nouvelles technologies de surveillance de la qualité de l'eau en continu sont aujourd'hui disponibles (Estrin *et al.*, 2003; Pellerin *et al.*, 2009; Pellerin *et al.*, 2012) et laissent entrevoir une solution efficace et peu coûteuse pour renforcer la capacité de surveillance.

### **La surveillance en pratique : étude de cas du bassin de la rivière Saskatchewan**

Le bassin de la rivière Saskatchewan (BRS) et, en particulier, de son affluent méridional, la rivière Saskatchewan Sud, abrite la majorité des terres agricoles irriguées au Canada ainsi qu'un important segment d'exploitations agricoles non irriguées. Son climat varie de sous-humide à semi-aride (Statistique Canada, 2011b). Dans le cadre du plan de gestion des eaux du bassin de la rivière Saskatchewan Sud adopté en 2006, les sous-bassins de la rivière sont assujettis à de nouveaux moratoires sur les permis d'utilisation de l'eau en raison de pénuries d'eau permanentes (Alberta Environment, 2006). Le réseau de stations hydrométriques actuellement en opération et faisant partie du Réseau des stations hydrométriques du Canada pour la mesure des débits et du niveau des lacs dans le bassin de la rivière Saskatchewan est illustré à la figure 3.6.

Le lac Diefenbaker soutient plus de 40 000 hectares de fermes irriguées (Gouvernement de la Saskatchewan, 2008) et fournit de l'eau potable à de nombreuses collectivités de la province (Gouvernement de la Saskatchewan, 2008). La densité des stations dans la section est du BRS est insuffisante pour estimer le débit entrant des prairies dans le lac Diefenbaker, ce qui entrave la gestion efficace du réservoir pour l'approvisionnement en eau et pour le contrôle des crues (Centre for Hydrology, 2012). Les débits entrant des prairies sont peu fréquents mais lorsqu'ils surviennent, ils peuvent hausser le niveau du réservoir au-delà de celui prévu pour l'écoulement des eaux venant des montagnes. Les récentes inondations de terres agricoles en aval du lac ont été imputées à un manque de mesures des débits entrant des prairies, mais le maintien d'un faible niveau d'eau dans le lac en prévision des débits entrants non mesurés limite sa capacité d'approvisionnement en eau agricole et le potentiel d'irrigation au cours des années de sécheresse (Centre for Hydrology, 2012).



Source des données : Centre for Hydrology, 2012

Figure 3.6

### Stations hydrométriques du bassin de la rivière Saskatchewan

Cette carte montre les stations hydrométriques en opération qui font partie du Réseau des stations hydrométriques du Canada et qui mesurent le débit des cours d'eau et le niveau des lacs du bassin de la rivière Saskatchewan. Les jauges en bleu fournissent les débits en temps quasi réel à l'aide de courbes d'étalonnage, sur le site Web des Relevés hydrologiques du Canada, tandis que les jauges en rouge fournissent des données archivées dans les Relevés hydrologiques du Canada (RHC).

Dans la version la plus récente de son *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM, 2008), l'Organisation météorologique mondiale (OMM) présente des recommandations à jour pour les densités minimales de réseau fondées sur les unités physiographiques. Selon un rapport récent qui a évalué le Réseau des stations hydrométriques du Canada en regard de ces normes, 224 000 km<sup>2</sup> de l'écorégion des Prairies répondaient aux normes de densité de mesures de l'OMM, mais 157 000 km<sup>2</sup> ne les respectaient pas; sur l'étendue de territoire qui ne respectait pas ces normes, 28 % ne faisait l'objet d'aucun jaugeage, tandis que le reste était jaugeé à des densités de réseau inférieures aux normes de l'OMM (Centre for Hydrology, 2012; Coulibaly et Samuel, 2011) (voir la figure 3.7). Cela accroît l'incertitude dans la gestion de l'eau agricole et limite la possibilité d'optimiser la production agricole avec les approvisionnements en eau disponibles.

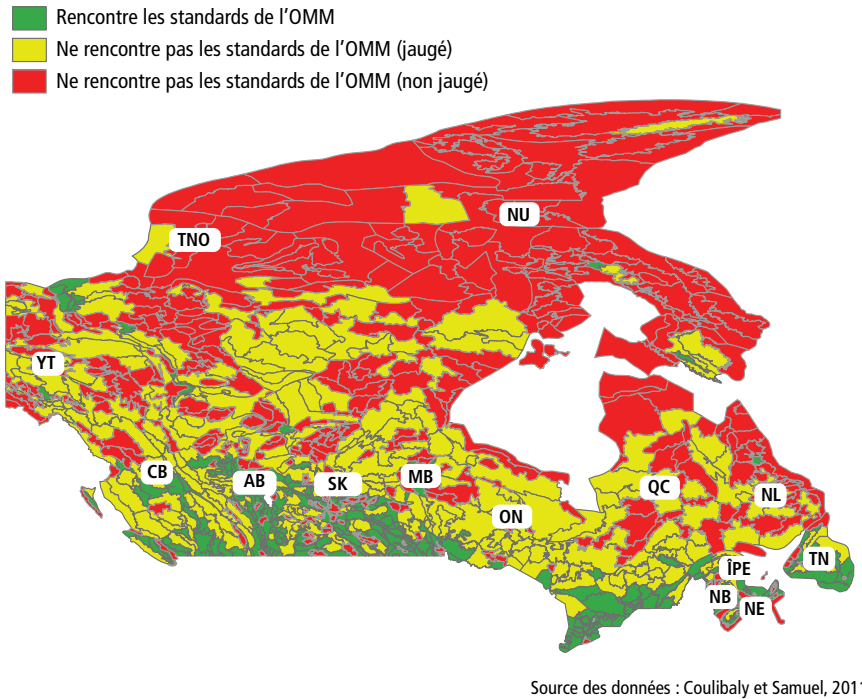


Figure 3.7

**Carte du Canada montrant la densité des stations hydrométriques en comparaison des normes de l'Organisation météorologique mondiale par bassin fluvial**

Cette carte fournit une évaluation récente de la densité du Réseau des stations hydrométriques du Canada en comparaison de la norme de densité minimale de l'Organisation météorologique mondiale, qui indique que plusieurs régions du Canada ne rencontrent pas cette norme.

La solution de rechange à une mesure directe du débit est d'employer un modèle hydrologique. Un modèle hydrologique utilise des données météorologiques pour calculer les débits des cours d'eau et l'humidité dans le sol, entre autres variables. Les données, en particulier celles sur les précipitations, doivent être recueillies à proximité des principales zones de production de ruissellement; dans l'Ouest du Canada, celles-ci se trouvent principalement dans les montagnes. Une étude, qui doit paraître bientôt, a constaté que le réseau de stations météorologiques dans les montagnes Rocheuses canadiennes ne rendait pas compte de la distribution de fréquence des élévations dans cette région (John Pomeroy, communication personnelle). En outre, chaque station de mesure des précipitations dans les Rocheuses canadiennes recueille, en moyenne, des échantillons pour une superficie 23 fois plus étendue que la norme minimale recommandée par l'OMM. Étant donné que le ruissellement provenant des montagnes est la principale source d'eau pour l'irrigation dans l'Ouest du pays, cette densité de mesure est inadéquate aux fins de la gestion de l'eau agricole. Le comité d'experts souligne que cette incertitude peut compliquer sérieusement la gestion des réservoirs d'approvisionnement en eau pour l'irrigation, notamment lorsqu'elle s'inscrit dans un régime d'exploitation qui poursuit plusieurs objectifs. Une telle incertitude est considérée inacceptable aux États-Unis, où l'USDA gère le réseau relativement dense de stations SNOTEL pour la mesure de la neige et des conditions météorologiques en haute altitude aux fins de prévoir l'approvisionnement en eau d'irrigation pour l'agriculture et de gérer les réservoirs d'irrigation. Les produits de télédétection et de modélisation pourraient constituer des sources de données potentiellement utiles pour enrichir les observations faites sur le terrain. De telles données sont disponibles auprès du Service météorologique du Canada (SMC) et du National Operational Hydrologic Remote Sensing Center (NOHRSC), de la National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis, située au Minnesota, pour pallier ces données clairsemées (Environnement Canada, 2012a; NOAA, 2012b). Malheureusement, les cartes produites par télédétection en hyperfréquences passives<sup>22</sup> de l'équivalent en eau de la neige (EEN) ne sont pas fiables durant la période de fonte (notamment sur les sols non gelés), lorsqu'il y a une couche de glace ou de poussière, dans les régions où il y a de la végétation et dans les cas où l'accumulation de neige est importante (Centre for Hydrology, 2012). Par conséquent, le comité d'experts note que ces cartes nécessitent une validation minutieuse et une correction des erreurs pour les relevés de neige afin de faire une contribution fiable à la prévision des débits des cours d'eau.

---

22 Pour consulter les cartes, voir le site [http://www.socc.ca/CMS%20FTP%20Data/snow/swc/snow\\_swe.html](http://www.socc.ca/CMS%20FTP%20Data/snow/swc/snow_swe.html).

Le Centre météorologique canadien produit des cartes de la profondeur de la couche de neige à partir des mesures de l'accumulation de neige au sol, avec interpolation dans l'espace et dans le temps, en utilisant les données des champs *température* et *précipitations* du modèle numérique de prévision météorologique du SMC<sup>23</sup>. Le NOHRSC procède à des levés aériens de spectrométrie gamma de la neige dans les bassins de drainage de la rivière Missouri et de la rivière Souris, mais non dans le bassin de la rivière Saskatchewan. Il fournit toutefois un produit EEN à résolution d'un kilomètre qui est fondé sur une assimilation des données disponibles recueillies en surface et par satellite; ce modèle numérique de prévision météorologique alimente un modèle physique des rafales de neige et de la fonte des neiges appelé SNODAS<sup>24</sup>, qui repose en partie sur des modèles de neige élaborés en Saskatchewan (Pomeroiy et Li, 2000). Les résultats du modèle SNODAS fournis par le NOHRSC s'étendent vers le nord jusque dans la région centrale de la Saskatchewan et de l'Alberta et sont utilisés par les responsables des prévisions des crues dans les régions de prévision du NOAA. Le modèle SNODAS est considéré comme étant à la fine pointe pour ce qui est des produits EEN opérationnels, et il constitue une source potentiellement précieuse de renseignements pour les prévisions portant sur les cours d'eau. S'il est développé et appliqué dans le BRSS, le comité d'experts est d'avis qu'il pourrait constituer un outil utile pour aider à prédire et à gérer les risques d'inondation, une problématique qui suscite des préoccupations de plus en plus sérieuses dans plusieurs régions des provinces des Prairies.

### Les programmes de surveillance des eaux souterraines au Canada

En comparaison de la portée aréale et de l'étendue des données historiques sur les activités de surveillance des eaux de surface au Canada, la surveillance des eaux souterraines est beaucoup plus localisée et, souvent, gérée au niveau provincial. Ressources naturelles Canada administre une base de données nationale sur les eaux souterraines qui renferme les fichiers fédéraux liés à un réseau restreint de puits de surveillance des nappes d'eaux souterraines et des données hydrogéologiques tirées des projets et des programmes fédéraux (voir le tableau 3.2). Plusieurs provinces ont mis en place des réseaux de puits de surveillance à l'échelle régionale au cours de la dernière décennie. À titre d'exemple, l'Ontario administre le Système provincial d'information sur le contrôle des eaux souterraines (SPICES), qui est un réseau géré sur Internet de plus de 400 puits d'observation produisant des données sur le niveau et la qualité des eaux souterraines partout en Ontario (Environnement Canada et ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2011). Les renseignements provenant du SPICES servent de système de préalerte pour les changements dans les niveaux des nappes d'eau causés par les conditions climatiques ou l'activité humaine, ainsi que les changements dans la qualité de l'eau attribuables

23 Pour consulter les cartes, voir le site [http://www.weatheroffice.gc.ca/data/analysis/352\\_50.gif](http://www.weatheroffice.gc.ca/data/analysis/352_50.gif).

24 Pour consulter les cartes, voir le site <http://www.nohrsc.noaa.gov/nsa/>.

à des facteurs naturels ou anthropiques. Ces renseignements servent à appuyer une prise de décision éclairée sur les prélèvements d'eau, la gestion des périodes de sécheresse et la planification de l'utilisation des terres. Des réseaux similaires de puits de surveillance ont été établis en Alberta, au Nouveau-Brunswick et à l'Île-du-Prince-Édouard, notamment. La coordination fédérale de la gestion et de l'intégration des données provenant des réseaux provinciaux de surveillance des eaux souterraines serait une étape essentielle en vue de créer la base de données requise pour éclairer tous les aspects d'une gestion durable de l'utilisation des eaux souterraines à des fins agricoles.

### Autres aspects de la surveillance des eaux

En plus des programmes de surveillance des eaux de surface et des eaux souterraines décrits précédemment, le gouvernement fédéral (par le biais d'Environnement Canada, de Pêches et Océans Canada, de Ressources naturelles Canada, d'Agriculture et Agroalimentaire Canada et de l'Agence spatiale canadienne) est aussi responsable de la collecte de diverses données atmosphériques et climatiques et de données sur les chutes de neige et l'humidité dans le sol (Service météorologique du Canada – Environnement Canada, 2008). Certains de ces programmes sont énumérés et décrits brièvement dans le tableau 3.2. Les provinces et les municipalités participent à certains autres aspects de la surveillance des eaux dans leur sphère de responsabilité respective.

**Tableau 3.2**

Exemples de programmes de surveillance des eaux au Canada

Réseau de stations climatologiques de référence (SCR)	Un réseau de 305 stations gérées par le Service météorologique du Canada (SMC) qui comprend également le GSN (ci-dessous). Le réseau des SCR sert principalement à déterminer les tendances climatiques à l'échelle régionale et nationale grâce à une combinaison de stations automatisées, de sites d'observation humaine des conditions climatiques pour l'aviation gérés par du personnel, et de stations climatologiques qui mesurent quotidiennement la température et les précipitations.
Système mondial d'observation du climat (SMOC)/Réseau de surface (GSN)	La contribution du Canada au SMOC/GSN comprend 87 stations, la plupart automatisées et dotées de capteurs standardisés, des algorithmes de mesure, de traitement et de production de rapports, ainsi que des normes et des procédures d'inspection et d'entretien. En plus de faire rapport sur les variables climatologiques essentielles, ces stations mesurent la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, l'humidité et la profondeur de la couche de neige. Certaines lacunes subsistent dans les données du GSN, notamment dans les régions éloignées du Nord où l'installation et l'entretien de stations automatisées est coûteux et prohibitif.

Veille météorologique mondiale/Système mondial d'observation (VMM/SMO) des eaux de surface	Un réseau synoptique de 812 stations, y compris des SCR automatisées qui font rapport sur la série de 13 variables climatologiques essentielles et, dans certains cas, la radiation solaire et la température du sol. Le réseau d'observation météorologique horaire de surface du Canada comprend ces stations synoptiques et les stations météorologiques pour l'aéronautique qui produisent les messages d'observation météorologique régulière pour l'aviation (METAR). En outre, il y a 149 stations climatologiques régionales de base et 306 stations synoptiques régionales de base.
Système d'observation du climat des glaciers	Sous la direction de la Commission géologique du Canada de Ressources naturelles Canada, un système fondé sur des mesures <i>in situ</i> dans un réseau de référence de glaciers de la Cordillère occidentale et nordique et de l'archipel Arctique, qui rend compte des changements observés dans les données sur la longueur et le bilan massique recueillies par des aéronefs et le système de télédétection par satellite et fournies à certains centres de données désignés dans le monde.
Base de données nationale sur les eaux souterraines	Il n'y a pas de réseau national de surveillance de la quantité et de la qualité des eaux souterraines au Canada. Il y a relativement peu de puits d'observation actifs et l'étendue des données historiques sur les eaux souterraines est relativement courte et montre souvent des ruptures de continuité en raison des changements de programmes. Néanmoins, la base de données nationale sur les eaux souterraines sert de dépôt pour les registres numériques de Ressources naturelles Canada et sert à cataloguer les renseignements conservés par d'autres organismes.
Réseaux provinciaux de surveillance des eaux souterraines	Plusieurs provinces ont mis en place des réseaux de puits de surveillance des eaux souterraines un peu partout sur leur territoire pour recueillir des données sur le niveau et la qualité des eaux souterraines dans une perspective spatiale et temporelle. Ces données sont conservées dans des bases de données gérées par les provinces et elles peuvent être utilisées par divers intervenants. La conception et la taille des réseaux varient d'une province à l'autre et la durée historique des registres est également propre à chaque province.
Humidité dans le sol	Il n'y a pas de réseau national de surveillance <i>in situ</i> de l'humidité dans le sol; la surveillance se fait habituellement de façon ponctuelle et il y a un manque de coordination entre les différents organismes concernés.

Source : Service météorologique du Canada – Environnement Canada, 2008.

Ce tableau présente certains des programmes de surveillance en place au Canada, accompagnés d'une brève description. Le tableau ne vise pas à être exhaustif.

En dépit de toutes ces initiatives et d'une participation importante du Canada aux activités de surveillance internationale, un rapport publié en 2008 par le SMC a révélé que la coordination nationale des programmes de surveillance atmosphérique, océanique et terrestre était insuffisante (Service météorologique du Canada – Environnement Canada, 2008). Tel que noté par le Bureau du vérificateur général du Canada et d'autres, cette coordination est une caractéristique essentielle des systèmes efficaces et efficients de surveillance de l'environnement (Bureau du vérificateur général du Canada, 2011; CCME, 2006).

À une échelle plus réduite, le Canada offre quelques bons exemples de stratégies bien coordonnées de surveillance globale des bassins hydrographiques, axées sur des domaines de préoccupation particuliers (voir l'encadré 3.1). Le comité d'experts est d'avis que ces exemples illustrent comment une telle approche peut contribuer à éclairer la gestion efficace des ressources hydriques du Canada.

L'analyse qui précède a porté principalement sur les données ayant trait à l'environnement naturel. Pour assurer une gestion efficace des ressources hydriques, il est essentiel d'avoir des renseignements sur l'utilisation de l'eau. Habituellement, les responsables

### **Encadré 3.1**

#### **Le bassin hydrographique de la rivière Milk : exemple de stratégie de surveillance globale et coordonnée**

##### **Stratégie de surveillance**

Le bassin hydrographique de la rivière Milk, dans le Sud de l'Alberta (qui s'écoule aussi en Saskatchewan et au Montana), se caractérise par un climat aride, une flore et une faune diversifiées et le fait qu'il constitue le seul bassin hydrographique en Alberta s'écoulant vers le golfe du Mexique (Milk River Watershed Council Canada, 2008, 2011d). L'eau qui alimente la rivière Milk provient de la fonte des neiges (de 50 à 80 %) et du ruissellement des précipitations (de 20 à 50 %), auxquelles s'ajoute l'eau provenant d'un transfert interbassin du système de la rivière St. Mary, qui prend sa source aux États-Unis mais s'écoule vers le bassin de la rivière Saskatchewan Sud (Milk River Watershed Council Canada, 2011b).

##### **Le Milk River Watershed Council Canada (MRWCC)**

Société sans but lucratif, le MRWCC a été désigné en 2003 comme conseil de planification et de consultation du bassin hydrographique, dans le cadre de la stratégie *Water for Life* de l'Alberta. L'organisme vise à encourager l'utilisation durable et la gestion intégrée des ressources terrestres et hydriques en élaborant des programmes pour évaluer et surveiller l'état du bassin hydrographique, enrichir les connaissances au sein de la communauté et accroître la participation des intéressés et, enfin, promouvoir l'adoption de PGB pour conserver la diversité de la flore et de la faune (Milk River Watershed Council Canada, 2008).

##### **Projets et programmes de surveillance quantitative et qualitative du MRWCC**

Depuis sa création, le MRWCC a entrepris un certain nombre de projets et de programmes de surveillance de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau afin d'aider à orienter les efforts de gestion durable. En voici quelques exemples :

*Suite à la page suivante*



- Le *projet pilote des irrigants privés*, conçu pour rendre compte avec précision de toute l'eau d'irrigation utilisée dans la partie albertaine du bassin hydrographique de la rivière Milk, et permettre ainsi une compréhension plus détaillée de l'utilisation de l'eau.
- Le projet *MiRTAP – projet de l'aquifère transfrontière de la rivière Milk*, lancé en partenariat avec la Commission géologique du Canada, qui vise à créer une base de données uniformisée sur les eaux souterraines qui permettra d'élaborer un modèle tridimensionnel unifié de l'aquifère, sans tenir compte des frontières, et d'obtenir ainsi une meilleure compréhension de l'approvisionnement actuel de la nappe souterraine et des tendances de l'utilisation de l'eau.
- Le *programme de surveillance de la qualité de l'eau*, lancé en partenariat avec diverses autres organisations civiles, a permis d'établir un cadre de référence pour la surveillance de la qualité des eaux de surface du bassin hydrographique à long terme.

(Milk River Watershed Council Canada, 2011c)

### **Résultats : un modèle à suivre pour d'autres bassins hydrographiques**

En définitive, les résultats préliminaires des projets entrepris par le MRWCC entre 2006 et 2008 illustrent l'utilité potentielle d'une surveillance en temps réel de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau au niveau d'un bassin hydrographique, et de la nécessité de disposer de renseignements plus détaillés sur les ressources hydriques afin d'évaluer et de préserver la l'état des ressources en eau du Canada pour l'avenir. Ces projets fournissent une manne de renseignements qui aident à guider l'élaboration d'un Plan de gestion intégrée de l'eau, conçu pour promouvoir et améliorer le dialogue entre le gouvernement, les organisations non gouvernementales et industrielles, ainsi que les propriétaires terriens et les résidents, ce qui facilitera éventuellement une gestion plus efficace des ressources naturelles du bassin hydrographique (Milk River Watershed Council Canada, 2011a, 2011c).

de la gestion de l'eau au Canada disposent de renseignements sur la quantité d'eau dont l'utilisation est autorisée, mais non sur les volumes d'eau réellement utilisés et le moment où l'eau est utilisée. Le comité d'experts estime qu'il faudra accorder une attention particulière aux données sur l'utilisation de l'eau pour améliorer la gestion de la ressource. Un exemple notable de progrès à cet égard est l'adoption volontaire d'un système de surveillance en temps réel de l'eau d'irrigation utilisée par les agriculteurs dans le bassin de la rivière Milk en Alberta (voir l'encadré 3.1).

### 3.6 LE RÔLE DE LA MODÉLISATION, DE LA PRÉVISION ET DE LA GESTION ADAPTATIVE

Bien que des données soient essentielles pour appuyer la gestion de l'eau à des fins agricoles, ces données sont généralement utilisées dans des modèles informatisés. Ceux-ci comprennent les modèles servant à estimer l'humidité dans le sol à partir de variables météorologiques à l'échelle d'un champ pour la gestion de l'irrigation, jusqu'aux modèles portant sur des systèmes entiers de ressources hydriques, utilisés pour optimiser la répartition des ressources.

#### L'utilité des modèles de prévision de l'eau au Canada

Il est reconnu que tous les paramètres portant sur le niveau des cours d'eau et des lacs et la qualité des eaux souterraines et de surface ne peuvent être mesurés à toutes les échelles. Par conséquent, la mesure de l'eau doit être complétée par une modélisation de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau dans les bassins non jaugés et les situations où il n'est pas possible de prélever des mesures (Sivapalan *et al.*, 2003). Ces modèles comportent habituellement a) des méthodes statistiques utilisant des données historiques pour calculer les probabilités des débits, du stockage ou de la qualité de l'eau, lesquelles peuvent être extrapolées aux bassins non jaugés; b) des simulations continues des bassins hydrographiques pour prévoir la quantité d'eau et/ou la qualité de l'eau à divers endroits du bassin par simulation conceptuelle ou fondée sur des mesures physiques du cycle hydrologique et des flux biogéochimiques connexes (Spence *et al.*, 2005; Wagener *et al.*, 2004). Les simulations des bassins hydrographiques non jaugés peuvent reposer sur des paramètres extrapolés à partir de ceux obtenus en comparant les mesures de l'eau aux résultats des modèles pour les bassins jaugés de la région (McIntyre *et al.*, 2005), en choisissant des paramètres à partir des caractéristiques des mesures des bassins hydrographiques recueillies par télédétection et par des relevés sur le terrain (Fang *et al.*, 2010; Pomeroy *et al.*, 2007) ou une combinaison des deux (Bulygina *et al.*, 2012; Dornes *et al.*, 2008).

Les modèles ont aussi un important rôle à jouer dans l'exploration des conditions futures qui, par définition, ne peuvent être mesurées. Ils peuvent servir de guide pour la planification et la gestion, par exemple, en simulant les effets potentiels de différentes stratégies de gestion. Les simulations prédictives des bassins hydrographiques s'appuient sur des données météorologiques provenant des observations recueillies dans les stations ou des résultats des modèles atmosphériques. Lorsque les résultats des modèles atmosphériques sont utilisés, des simulations peuvent être faites pour déterminer les conditions futures possibles, par exemple les scénarios de changement climatique (Jackson *et al.*, 2007). Les modèles servent aussi à faire des prévisions, en utilisant les prévisions météorologiques comme intrants en temps réel dans des modèles qui estiment les débits, le stockage, la qualité de l'eau, etc. (voir, par exemple, Young, 2008b).

### Modélisation des bassins fluviaux au Canada

Certaines provinces disposent d'une capacité de modélisation des ressources hydriques pour la prévision des crues et des approvisionnements en eau. À titre d'exemple, la Colombie-Britannique, l'Ontario, le Québec et l'Alberta possèdent des modèles au niveau des bassins hydrographiques (p. ex. SSAR, UBC, WRMM, Hydrotel)<sup>25</sup> qui sont utilisés de façon continue à des fins diverses et multiples dans leurs bassins fluviaux. D'autres provinces se butent à des contraintes géographiques dans l'application de modèles ou ne disposent pas d'une capacité de modélisation. Il n'y a pas de jumelage des modèles provinciaux des ressources hydriques, ni de modélisation de l'ensemble des bassins fluviaux interprovinciaux par les gouvernements des provinces. Environnement Canada utilise des modèles hydrologiques-atmosphériques jumelés qui transcendent les frontières provinciales et nationales pour l'estimation des approvisionnements en eau dans le bassin des Grands Lacs, et a fait la démonstration de modèles à grande échelle pour les bassins de la rivière Saskatchewan Sud et du fleuve Mackenzie (Pietroniro *et al.*, 2007). Ce ne sont pas des modèles opérationnels pour la gestion de l'eau ou la prévision des crues. Il n'y a pas de modélisation régulière de la qualité des eaux utilisées au Canada, quoique la température de l'eau soit modélisée dans certaines provinces. L'Alberta possède une capacité de modélisation pour la gestion des ressources hydriques dans les bassins où il y a une demande d'eau à des fins d'irrigation. Plusieurs universités possèdent aussi une capacité de modélisation hydrologique, de gestion de l'eau et de la qualité de l'eau.

Les prévisions météorologiques au Canada sont effectuées principalement par Environnement Canada à l'aide d'un modèle numérique de prévision de la température, appelé GEM (géocartographie de l'énergie et des minéraux), pour des périodes allant jusqu'à trois semaines, et des modèles climatiques pour les prévisions saisonnières. L'Université de la Colombie-Britannique offre un produit GEM de prévision globale pour la gestion des eaux de BC Hydro, qui est aussi utilisé par le ministère de l'Environnement de l'Alberta à des fins prévisionnelles. Les prévisions portant sur l'eau sont effectuées au Canada par les organismes et les ministères provinciaux responsables de l'environnement et de l'agriculture à des fins de gestion des risques d'inondation et d'approvisionnement en eau, en recourant à diverses méthodes.

### Conséquences pour la gestion de l'eau en agriculture

L'agriculture est concernée par l'ensemble des méthodes décrites précédemment, dans la perspective de la gestion des risques liés à la production agricole par des mesures appliquées au niveau de la ferme et les initiatives de gestion des approvisionnements en eau des autorités provinciales. Les modèles de simulation ont un rôle important à jouer dans l'évaluation des répercussions potentielles du changement climatique et des effets

---

25 Voir, par exemple, Gouvernement de l'Alberta, 2005.

de diverses stratégies de gestion (voir, par exemple, Jackson *et al.*, 2007). Cependant, la complexité de l'hydrologie dans les régions froides pose des sérieux défis pour les modèles de simulation, au niveau tant des variables hydrologiques que de la mesure de la qualité de l'eau. Il y a donc un besoin particulier d'améliorer la modélisation des effets de la gestion agricole, y compris les PGB, à l'échelle locale et régionale, et un besoin plus général de mieux représenter les incertitudes dans les modèles de simulation.

Lorsque les méthodes statistiques emploient des données historiques portant sur le climat, l'utilisation des terres, les débits et le stockage de l'eau pour prédire les risques associés à des événements météorologiques extrêmes, le problème de la non-stationnarité hydrologique engendre une incertitude considérable parce que les probabilités calculées à partir de données historiques ne sont pas nécessairement valides pour prédire des événements futurs (Milly *et al.*, 2008). Le changement climatique est une source majeure de non-stationnarité des données hydrologiques. Ainsi, au fil du temps, des changements ont été observés au Canada dans la quantité de pluie et de neige et les débits des cours d'eau (Burn *et al.*, 2010; Shook et Pomeroy, 2010, 2012; Dery *et al.*, 2009). Dans la plupart des cas, les débits courants et de pointe diminuent, tandis que les chutes de neige au printemps et en automne deviennent des chutes de pluie. Dans les provinces des Prairies, la durée des chutes de pluie va en augmentant alors que l'intensité quotidienne diminue (Shook et Pomeroy, 2012), mais dans d'autres régions, l'intensité des événements de précipitations est en hausse (Mailhot *et al.*, 2010). Les chutes de pluie maximales annuelles se déplacent de l'été vers le printemps ou l'automne (Mailhot *et al.*, 2010). Cette non-stationnarité se traduit par une plus longue saison de croissance, mais non nécessairement par une plus grande disponibilité de l'eau pour soutenir la production agricole sur l'ensemble de la saison de culture. Le comité d'experts croit que cela constitue un risque important pour l'agriculture canadienne.

Une surveillance étroite et des modèles robustes sont requis pour gérer le risque agricole dans le présent contexte de non-stationnarité. Selon la National Academy of Sciences (NAS) des États-Unis (2011) :

Même si nous n'avons pas encore une compréhension détaillée de l'hydroclimatologie, des techniques permettant de tenir compte de l'éventualité d'une aggravation des événements climatologiques et hydrologiques extrêmes à partir de séries historiques et de marges d'erreur spécifiques sont disponibles et ces techniques s'appuient sur des données d'observation suffisantes. Une surveillance élémentaire des principaux éléments du cycle hydrologique fournit une source précieuse de renseignements qui revêt une importance critique dans un contexte de non-stationnarité [traduction].

Tout en insistant sur la nécessité de disposer d'un solide réseau d'observation de la météorologie et de l'eau, la NAS précise que cela n'élimine pas le besoin de faire progresser la science prévisionnelle : « Tout en étant utile à court terme, le recours à l'analyse de données d'observation *a posteriori* pourrait masquer la valeur inhérente de la recherche visant à établir la causalité et à améliorer les prévisions » [traduction] (NAS, 2011).

Étant donné que la capacité de surveillance et de prévision au Canada ne semble pas aussi avancée qu'aux États-Unis, le comité d'experts est d'avis que le développement d'une meilleure capacité intégrée de surveillance et de prévision au Canada permettrait de mieux gérer les risques en agriculture, notamment à la lumière de la non-stationnarité hydrométéorologique sans précédent attribuable au changement climatique. Ainsi, les prévisions hydrologiques pour les approvisionnements en eau et les crues sont souvent faites par des sections différentes des ministères de l'Environnement des provinces, tandis que les prévisions du taux d'humidité des sols proviennent des ministères fédéral et provinciaux de l'agriculture et que les mesures sont prises par un large éventail de ministères fédéraux et provinciaux. Il y a une collaboration limitée entre ces groupes en vue d'optimiser les réseaux d'observation et les systèmes de prévision pertinents à l'approvisionnement en eau des exploitations agricoles. Le comité d'experts croit que le secteur agricole canadien retirerait des avantages considérables d'une coordination officielle des réseaux d'observation hydrométéorologique et des systèmes de prévision de la température et de l'approvisionnement en eau, tant pour l'agriculture non irriguée que pour l'agriculture irriguée.

De meilleures estimations des probabilités d'événements hydrométéorologiques extrêmes et de l'approvisionnement en eau pourraient faciliter une gestion adaptative des activités agricoles et l'élaboration de méthodes de gestion de l'eau applicables au Canada. Cela est d'autant plus important que la non-stationnarité attribuable au changement climatique engendre de sérieuses incertitudes pour l'agriculture mondiale (Nelson *et al.*, 2010). Une gestion adaptative sera nécessaire pour la production agricole au Canada en raison de l'aggravation des inondations et des périodes de sécheresse extrêmes dans un contexte de changement climatique et d'évolution des conditions hydrométéorologiques vers une diminution des chutes de neige et du ruissellement accompagnant la fonte des neiges. L'augmentation des variations interannuelles des conditions hydrométéorologiques signifie que les gestionnaires des terres agricoles et les autres intervenants devront disposer d'un large éventail d'outils de gestion pouvant être déployés le plus rapidement possible (Pahl-Wostl, 2007; UNESCO, 2012). Une plus grande diversité au niveau de la gestion sur la ferme pourrait aussi jouer un rôle important pour assurer la résilience de la production agricole face à l'incertitude élevée des prévisions et à la non-stationnarité hydrométéorologique.

### Exercices de prospectives et de prévision de la disponibilité de l'eau

Tel qu'indiqué au chapitre 2, devant un avenir incertain, de nouvelles méthodes de planification et de gestion des risques sont requises. Les méthodes de prévision traditionnelles comportent de sérieuses limites (Lempert et Schlesinger, 2000) et de nouvelles approches sont nécessaires afin de gérer les risques liés à l'incertitude élevée des ressources hydriques futures (Wheater, 2009).

Les exercices de prospective sont des outils facilitant l'analyse de la disponibilité de l'eau et des profils de consommation. Un exercice de prospective a été réalisé au Canada par la Table ronde nationale sur l'économie et l'environnement (TRNEE), un organisme indépendant regroupant des « chefs de file de la durabilité » des milieux d'affaires, du secteur universitaire, des syndicats, des organismes communautaires, etc. qui a conseillé le gouvernement du Canada sur les politiques. En 2010 et 2011, la TRNEE a publié deux rapports, *Courant de changement* et *Cap sur l'eau*. Ces rapports décrivent l'état des ressources hydriques du Canada et l'utilisation qui en est faite par l'industrie (y compris l'agriculture) et les municipalités et ils renferment des prévisions sur l'utilisation de l'eau (TRNEE, 2010a, 2011).

Ailleurs, d'autres organisations ont aussi entrepris des exercices de prospective centrés sur l'utilisation future de l'eau, ce qui intéresse les gouvernements partout dans le monde. Au Royaume-Uni, le Foresight Program, un organisme dirigé par le conseiller scientifique en chef du gouvernement, qui relève directement du premier ministre et du Cabinet, produit régulièrement des prévisions. L'un des rapports qu'il a publiés en 2011, *The Future of Food and Farming*, renferme des prévisions sur la façon dont les pressions qui pèsent sur les approvisionnements mondiaux en aliments évolueront sous l'effet de la croissance démographique, et il analyse comment l'agriculture pourrait répondre à cette demande tout en préservant la santé de l'environnement (Foresight, 2011). Si les exercices de prospective peuvent constituer des outils utiles, il importe de souligner qu'ils reflètent les opinions d'un groupe d'auteurs et que le fondement scientifique de toute prévision doit être soumis à un examen critique.

Un exemple d'exercice de prévision visant à mieux comprendre les débits d'eau se déroule en Australie, où l'accès à des quantités suffisantes d'eau douce soulève des préoccupations particulières. La Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), l'organisme scientifique national en Australie, a mis sur pied le projet Seasonal and Long-Term Water Forecasting and Prediction (dans le cadre de la Water Information and Research and Development Alliance). Le mandat de cet organisme est de surveiller, d'évaluer et de prédire avec précision la disponibilité et l'état des ressources en eau douce en Australie. L'organisme prévoit avoir développé d'ici 2013 des méthodes statistiques précises pour faire des prévisions saisonnières des débits des cours d'eau et du ruissellement. Il dispose aussi d'approches de modélisation pour les

prévisions des débits des cours d'eau (CSIRO, 2011). Même s'il ne fait pas de prévisions sur la façon dont l'utilisation de l'eau évoluera, les renseignements qui ressortent des outils de prévision seront mis à la disposition des autres ministères qui doivent prendre des décisions en lien avec la politique de l'eau.

### Orientations futures en matière de surveillance et de modélisation

Pour que les ressources en eau douce du Canada soient gérées de façon durable, il est nécessaire d'évaluer tous les risques potentiels pour la quantité d'eau et la qualité de l'eau. Le Bureau du vérificateur général du Canada a recommandé une approche axée sur le risque pour établir les priorités en matière de surveillance de l'eau afin que le Canada puisse maximiser ses ressources actuelles en ciblant les activités et les substances qui pourraient poser les risques les plus grands pour la quantité d'eau et la qualité de l'eau disponible (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Cependant, une approche axée sur le risque s'appuyant uniquement sur des observations historiques sous-estimerait les risques présents en raison de la non-stationnarité causée par le changement climatique. De plus, il n'est pas physiquement possible et il pourrait ne pas être économiquement souhaitable de surveiller tous les risques éventuels. Ces considérations nous obligent à envisager une approche intégrée de la gestion du risque qui allie la surveillance, la modélisation et l'analyse et qui cible les incertitudes connexes (voir Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011). La meilleure façon d'y parvenir serait d'adopter un cadre de gestion adaptative, tel qu'indiqué précédemment.

Le comité d'experts estime également qu'une capacité intégrée de surveillance et de prévision de l'eau et du climat au Canada permettrait une meilleure gestion des risques en agriculture à la lumière de la non-stationnarité hydrométéorologique sans précédent causée par le changement climatique. Selon le comité, une telle approche pourrait faire une contribution substantielle à la capacité du Canada de gérer de manière durable ses ressources hydriques, ce qui ferait un apport inestimable pour atténuer les risques, exploiter les possibilités qui se présenteront et éclairer les politiques et les décisions de gestion.

### Points saillants du chapitre

#### L'état des ressources hydriques pour l'agriculture au Canada

- L'accès à une eau douce de bonne qualité est une considération dominante pour l'agriculture canadienne, mais celle-ci peut avoir des répercussions importantes sur l'environnement aquatique. Une compréhension de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau et des liens entre la gestion des terres et de l'eau est essentielle à la gestion de l'eau et à la prospérité du secteur agricole canadien.

*suite à la page suivante*

### **Les problèmes liés à la disponibilité de l'eau**

- Dans la plus grande partie des terres agricoles, la disponibilité de l'eau est tributaire des précipitations naturelles, mais l'irrigation et la production animale intensive sont les principales utilisations consommatrices d'eau au Canada et elles entrent en concurrence avec d'autres formes d'utilisation de cette ressource. Le Canada n'a pas de réserves illimitées d'eau pour assurer l'expansion ou l'intensification des activités agricoles et de fortes pressions se font déjà sentir en ce qui a trait à la disponibilité de l'eau dans certaines parties de l'intérieur de la Colombie-Britannique, des provinces des Prairies et du Sud de l'Ontario, ainsi que des contraintes importantes liées à l'eau pour la productivité actuelle de l'agriculture dans certaines régions.

### **Les problèmes liés à la qualité de l'eau**

- De sérieux problèmes de qualité de l'eau se posent en raison des activités agricoles. Parmi ceux-ci, il y a les effets des engrais inorganiques et du fumier, des pesticides, des agents pathogènes et des médicaments vétérinaires.
- Une préoccupation majeure concernant les eaux de surface est l'eutrophisation, qui est principalement attribuable à l'azote et au phosphore; le problème le plus répandu en ce qui concerne la qualité des eaux souterraines est la contamination par les nitrates. Les causes de la pollution des eaux de surface par les nutriments sont notamment la pollution de l'air, les déversements d'eaux usées urbaines et rurales, ainsi que l'écoulement des engrais agricoles et du fumier dans les cours d'eau récepteurs; la contamination des eaux souterraines par les nitrates provient essentiellement de la lixiviation des engrais et du fumier appliqué sur les terres agricoles.
- Le risque croissant de pertes d'azote en provenance des exploitations agricoles canadiennes dans le milieu aquatique est une problématique importante pour la gestion de l'eau agricole qui requiert la mise en place de meilleures techniques de gestion. Ainsi, la présence de concentrations élevées de nitrates dans les eaux souterraines en milieu agricole est généralisée et constitue une menace sérieuse pour les puits d'eau potable privés et municipaux au Canada.
- Le phosphore a été associé à de graves proliférations d'algues dans les grands lacs des provinces des Prairies et de l'Ontario; même si les évaluations des risques montrent qu'environ le quart du pays est exposé à un risque modéré ou élevé de contamination au phosphore, cette substance ne fait pas l'objet d'une surveillance suffisante pour permettre d'évaluer adéquatement l'étendue du problème ou la façon de mieux le gérer.
- Les agents pathogènes présents dans les eaux agricoles ont provoqué des situations d'urgence pour la santé humaine et causé des décès au Canada au cours des dernières années. Si l'on considère l'impact potentiel sur la santé humaine, des travaux de recherche supplémentaires sur les microbes présents en milieu agricole dans les eaux de surface et les eaux souterraines ont une priorité élevée.

*suite à la page suivante*



- Il importe de tenir compte de l'impact cumulatif des pratiques agricoles, des flux de restitution des municipalités et de l'industrie, et des autres utilisations concurrentes, surtout lorsque des activités d'élevage intensives, des municipalités et des établissements industriels sont situés à proximité des plans d'eau alimentés par de multiples sources.
- Alors qu'augmentent les pressions au niveau de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau partout au Canada, l'agriculture et les autres secteurs devront s'efforcer de gérer de manière plus efficace et durable l'utilisation et la consommation de l'eau. L'interface entre l'agriculture et la qualité de l'eau est complexe et soulève d'importantes questions pour la science et les politiques liées aux mesures permettant de réduire au minimum les charges, d'atténuer les effets et, de façon plus générale, de promouvoir le rôle de l'agriculture en tant que producteur de biens et de services écosystémiques.

### **Surveillance et modélisation à l'appui d'une gestion adaptative**

- Les données actuelles sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau sont inadéquates à plusieurs égards. Des mesures effectuées à des échelles spatiales et temporelles adéquates sont requises à l'appui d'une gestion durable de l'eau en agriculture, à la fois comme mesures directes pour éclairer la prise de décision et comme intrants dans des modèles de prévision informatisés de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau aux endroits et aux moments où ces paramètres ne peuvent pas être mesurés.
- Le climat du Canada change, mais les projections quant à l'avenir sont incertaines. De graves périodes de sécheresse ont déjà sévi dans l'Ouest et le Centre du pays, tandis qu'il y a eu des inondations dans toutes les régions au cours de la dernière décennie. Cependant, les prévisions montrant que les périodes de sécheresse et les inondations vont s'intensifier dans un contexte de réchauffement climatique suscitent des inquiétudes. Le réchauffement des Rocheuses canadiennes et la diminution connexe de l'accumulation de neige au printemps pourraient nécessiter des changements dans la gestion de l'eau et une réévaluation du potentiel d'irrigation dans les régions en aval.
- Une gestion adaptative de l'agriculture canadienne est requise pour composer avec le changement climatique. De façon plus générale, l'expansion démographique, la croissance économique et l'évolution rapide des conditions environnementales placent la gestion des ressources hydriques au Canada devant des défis sans précédent, et de nouvelles approches seront nécessaires pour assurer une prise de décisions robuste en présence de telles incertitudes. L'intégration de la surveillance et de la prévision de l'hydrométéorologie et de l'approvisionnement en eau pour l'agriculture pourrait fournir des renseignements d'importance critique à l'appui d'une gestion adaptative, ce qui fait actuellement défaut au Canada. Une capacité intégrée de surveillance et de prévision de l'eau et du climat permettraient une meilleure gestion des risques pour l'agriculture canadienne, notamment à la lumière de la non-stationnarité hydrométéorologique sans précédent imputable au changement climatique.

# 4

## **La gestion des terres et de l'eau : les pratiques de gestion bénéfiques et la durabilité de l'agriculture**

- **Changements dans l'utilisation et la gestion des terres**
- **La gestion de l'eau dans le sol : irrigation et drainage**
- **Les pratiques de gestion bénéfiques**
- **Nouvelles perspectives pour l'agriculture durable au Canada – l'agriculture de conservation et l'approche axée sur les services écosystémiques**

## 4. La gestion des terres et de l'eau : les pratiques de gestion bénéfiques et la durabilité de l'agriculture

### Aperçu

La gestion des terres et de l'eau agricole peut avoir des effets dommageables et quantifiables sur l'environnement au Canada. Cependant, la présence et les causes de ces effets demeurent mal comprises en raison d'un manque de données pertinentes et de recherches sur le terrain. Des pratiques de gestion bénéfiques (PGB) conçues pour réduire au minimum ces effets sur l'environnement pourraient jouer un rôle utile en vue de préserver la quantité et la qualité des ressources hydriques nécessaires aux exploitations agricoles. Cependant, des recherches supplémentaires sur le rendement des PGB sont essentielles pour être en mesure de quantifier ces effets à l'échelle locale et régionale. Les PGB situent aussi le contexte pour deux notions connexes qui laissent entrevoir des avantages importants découlant d'un secteur agricole plus diversifié : l'agriculture de conservation, qui vise à créer des territoires résilients et productifs face à un avenir incertain, et une approche axée sur les biens et services écosystémiques, qui reconnaît la valeur des services non commercialisables comme la protection contre les inondations, la qualité de l'eau et la diversité écologique. Une perspective plus vaste du rôle de l'agriculture dans la prestation d'une gamme étendue de biens et de services à la société pourrait engendrer des avantages importants et ouvrir des débouchés à l'industrie agricole.

L'agriculture est un facteur critique pour le bien-être humain (Raudsepp-Hearne *et al.*, 2010) et la source d'un vaste ensemble de biens et de services écosystémiques bénéfiques<sup>26</sup>. Cependant, tel que décrit au chapitre 3, l'activité agricole peut aussi avoir des répercussions dommageables sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau. Pour la société, le défi consiste à élaborer et à mettre en œuvre des stratégies de gestion durable de la production agricole. Le comité d'experts estime que, pour relever ce défi, il faudra mettre l'accent sur les besoins essentiels en recherche, de concert avec l'adoption de l'agriculture de conservation et d'une approche axée sur les services écosystémiques dans la gestion des terres et de l'eau. Plus précisément, cela nécessitera des données et des connaissances scientifiques supplémentaires

26 Les biens et services écosystémiques sont des avantages que les gens retirent des écosystèmes (Bennett *et al.*, 2009). Les biens englobent les aliments, le bois d'œuvre, la fibre, etc.; les services englobent la pollinisation, le contrôle des inondations, la séquestration du carbone, etc.

sur la gestion des terres et de l'eau en milieu agricole, une évaluation des PGB et la compréhension des interactions complexes entre les multiples services écosystémiques dans les territoires agricoles.

Les questions que soulève la qualité de l'eau dans les territoires agricoles illustrent la nécessité de disposer de données et de connaissances scientifiques additionnelles dans ces domaines. Tout au long de l'histoire de l'humanité, l'eau a été un récepteur pour les déchets industriels et domestiques. Les centres urbains et les grands établissements industriels déversent habituellement leurs eaux usées à des endroits précis, qui sont des exemples de pollution ponctuelle. Les sources de pollution ponctuelle sont relativement faciles à repérer et cette forme de pollution est généralement mesurable. La plupart des pays développés ont mis en place des mesures de contrôle pour réglementer ces déversements. Cependant, d'autres formes de pollution se produisent sur de vastes étendues de territoire; la pollution non ponctuelle (ou diffuse) peut provenir du dépôt atmosphérique de contaminants, comme les pluies acides, ou de pratiques de gestion des terres largement répandues, comme les cultures agricoles; elles mettent en cause des voies et des interactions environnementales complexes et souvent mal comprises. La qualité de l'eau est par conséquent une problématique complexe – où l'agriculture joue un rôle important mais souvent mal compris.

Des exemples cités précédemment, comme celui du lac Winnipeg, montrent clairement que les grands problèmes qui se posent dans l'environnement aquatique et qui sont influencés par les pratiques agricoles existent dans notre pays. Mais jusqu'à quel point ces problèmes touchent-ils l'ensemble du territoire agricole hétérogène du Canada? Dans quelle mesure l'agriculture peut-elle jouer un rôle de premier plan pour résoudre ces problèmes et, plus généralement, pour fournir des biens et des services écosystémiques à l'ensemble de la société? Ce chapitre est structuré de manière à traiter des principaux aspects de la gestion de l'eau sur les fermes à des fins agricoles. Devant l'évolution rapide de la demande, ainsi que l'émergence et l'adoption de nouvelles pratiques de gestion des terres, la nature de l'utilisation des terres agricoles change constamment. Pour situer le contexte, la section 4.1 décrit les tendances actuelles de la gestion des terres agricoles, en faisant ressortir la diversité du secteur agricole canadien et ses conséquences pour l'environnement. La section 4.2 analyse les défis liés à la gestion de l'eau dans le sol à l'appui d'une gestion productive des cultures (y compris l'irrigation et le drainage), tandis que la section 4.3 examine la situation actuelle des PGB visant à réduire au minimum les effets de l'agriculture sur l'environnement. Enfin, la section 4.4 conclut le chapitre par une analyse du mouvement vers l'agriculture de conservation et la gestion des terres agricoles dans la perspective des services écosystémiques.

## 4.1 CHANGEMENTS DANS L'UTILISATION ET LA GESTION DES TERRES

### Évolution du paysage agricole

Au Canada, les exploitations agricoles occupent environ 160,2 millions d'acres (Statistique Canada, 2012). Bien que la superficie totale consacrée à la production agricole ait diminué par rapport au sommet de 174 millions d'acres enregistré en 1966 (Statistique Canada, 2012), la proportion consacrée aux cultures a augmenté progressivement jusqu'en 2006 (Huffman et Eilers, 2010). Entre 1981 et 2006, plus de 5 millions d'hectares sont venus s'ajouter à la superficie de terres en culture. Durant cette période, les niveaux de production de diverses cultures ont fluctué. Cependant, dans l'ensemble, la production totale de plusieurs types de cultures a augmenté, dont le blé d'hiver, le maïs-grain, les pois secs, le soja et le canola<sup>27</sup>. La taille des troupeaux d'élevage a également progressé de façon marquée. Ainsi, entre 1981 et 2006, la taille des cheptels porcins a augmenté de 50 %, tandis que celle des élevages de volailles était en hausse de plus de 30 % (Huffman et Eilers, 2010).

L'adoption de méthodes de conservation et de pratiques de culture sans labour au Canada a plus que doublé sur une période de 15 ans (de 1991 à 2006), ce qui montre que la collectivité agricole est disposée à adopter de nouvelles méthodes de gestion qui offrent une valeur (Huffman et Eilers, 2010). Les conditions du marché, les stratégies de production, le climat et d'autres facteurs ont aussi suscité des changements dans certaines tendances vers l'intensification. Néanmoins, des questions au sujet des effets de l'intensification des activités agricoles sur l'environnement continuent de se poser.

Les plus récentes tendances dans l'utilisation des terres agricoles au Canada ressortent du Recensement de l'agriculture, une enquête nationale menée par Statistique Canada à intervalles de cinq ans. La dernière enquête, qui remonte à 2011 et dont les résultats ont été publiés à l'été de 2012, révèle les tendances suivantes pour la période de 2006 à 2011 :

- la superficie totale mise en culture a diminué de 1,6 %, pour s'établir à 87,4 millions d'acres;
- les terres mises en culture demeurent la principale forme d'utilisation des terres agricoles, représentant 54,6 % de la superficie totale des exploitations agricoles;

27 Voir, par exemple, Statistique Canada, *Tableau 001-0017* – Estimation de la superficie, du rendement, de la production, du prix moyen à la ferme et de la valeur totale à la ferme des principales grandes cultures, en unités impériales; publication annuelle (données en milliers) CANSIM (base de données), <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?id=0010017&pattern=-1&p2=-1&p1=1&tabMode=dataTab&stByVal=1&paSer=&csid=&retrLang=fra&lang=fra>.

- les superficies mises en jachère ont diminué de 40,5 %, une baisse de 5,2 millions d'acres;
- la superficie totale de terres de pâturage, la deuxième plus importante forme d'utilisation des terres agricoles (31,2 %) a fléchi de 4,3 %, ce qui représente 50,0 millions d'acres;
- la superficie représentée par les terres forestières et les terres humides a reculé de 8,8 %, soit 12,1 millions d'acres, tandis que la catégorie « autres terres »<sup>28</sup> a progressé de 35,8 % (5,5 millions d'acres);
- le nombre total de bovins est en baisse de 18,9 % (à 12,8 millions de têtes), le nombre total de porcs a reculé de 15,7 % (à 12,7 millions de têtes), tandis que le nombre total de poules pondeuses et de poulettes a augmenté de 2,4 % (à 38,6 millions).

(Statistique Canada, 2012)

L'intensification de l'activité agricole a été associée à de profonds changements dans la physiologie et le contenu en nutriments des sols agricoles (voir la section 3.3). Toutefois, dans une perspective à plus long terme s'étendant sur plusieurs décennies, on observerait des changements encore plus fondamentaux dans l'utilisation et la gestion des terres des régions agricoles du Canada, par exemple les changements suscités par la conversion des pâturages naturels des prairies en terres arables cultivées. D'importantes questions scientifiques sont soulevées, d'une part, par l'impact de ces changements sur les aspects quantitatifs et qualitatifs de l'environnement aquatique et, de l'autre, par le potentiel qu'offre la gestion agricole pour en atténuer les effets défavorables. Ces questions sont examinées plus en détail ci-dessous.

### Pratiques de culture et de travail du sol

Des changements importants sont survenus dans les profils de cultures au cours des dernières années. Ainsi, la mise en jachère (non utilisation d'une parcelle de terre durant la saison de culture) était traditionnellement pratiquée dans les prairies. Le but était de conserver l'humidité dans le sol et d'améliorer la disponibilité en nutriments pour l'année suivante, accompagné d'un contrôle des mauvaises herbes par des pratiques de travail du sol ou l'épandage d'herbicides. À l'échelle nationale, la superficie des terres agricoles mises en jachère a diminué de 25,1 % entre 2001 et 2006 (Statistique Canada, 2009) et de 40,5 % entre 2006 et 2011 pour s'établir à 5,2 millions d'acres (la plupart dans les Prairies) (Statistique

28 Certaines terres du Manitoba, de la Saskatchewan et de l'Alberta ont été déclarées trop « détrempées pour être ensemencées » à la suite d'une inondation. Ces terres ont été classées dans la catégorie « autres terres » plutôt que dans celles des terres en culture ou en jachère. Si les conditions s'améliorent, ces terres pourraient retourner dans la catégorie pertinente (Statistique Canada, 2012).

Canada, 2012). Cela est attribuable à l'adoption de pratiques de gestion qui accroissent l'efficacité de l'utilisation de l'humidité disponible et qui permettent d'allonger le cycle de rotation des cultures ou de faire de la culture en continu sur les terres agricoles non irriguées (Eilers et Huffman, 2005), ainsi qu'à la nécessité économique de maintenir les terres arables en production (Statistique Canada, 2009) dans un secteur d'activité de plus en plus concurrentiel. La conversion de terres marginales en pâturages ou en couvert permanent a probablement aussi contribué à cette baisse (Eilers et Huffman, 2005).

Outre les changements survenus dans les pratiques de jachère, la proportion des terres consacrée aux cultures céréalières a fléchi partout au pays entre 1981 et 2006. Cela est partiellement imputable à une combinaison de faibles prix des denrées et de coûts élevés des intrants pour le blé et l'orge, ce qui a entraîné une substitution vers la production de plantes fourragères vivaces à faible coût (la luzerne cultivée, le foin cultivé, etc.) (Statistique Canada, 2009). La diversification des cultures s'est aussi manifestée par une transition vers la culture d'oléagineux, de légumineuses, de plantes fourragères et, dans une moindre mesure, de pommes de terre, de légumes, de baies et de raisins (Huffman et Eilers, 2010) ainsi que par la conversion de terres cultivées ou en jachère en pâturages ensemencés pour répondre à la demande d'aliments pour le bétail (Statistique Canada, 2009). Ces changements sont pertinents ici parce que les types de cultures et la gestion des terres peuvent changer les profils d'accumulation et d'infiltration de la neige, ainsi que l'écoulement de l'eau à travers le sol, ce qui modifie le ruissellement de surface et dans la sous-surface et, partant, les débits des rivières et la recharge des nappes souterraines (Harker *et al.*, 2004).

Il y a lieu de noter que les préférences du marché influent de plus en plus sur les pratiques de culture. Un exemple est l'industrie pomicole en Ontario, où la production a évolué de plantations à faible densité (100 arbres à l'acre) à des plantations à densité élevée (1 000 arbres à l'acre). De plus, le cycle allant de la plantation à la production a été ramené de dix ans à trois ans. Ces changements ont été mis en œuvre en réponse aux préférences des consommateurs pour des variétés nouvelles et des fruits de plus grosse taille. L'industrie n'utilisait pas beaucoup d'eau dans le passé, mais ces changements ont créé un besoin d'irrigation afin de maintenir un plus haut degré d'humidité, favoriser une croissance plus rapide et produire des fruits commercialisables dans un laps de temps plus court (O'Neill, 2011). Cette évolution des méthodes de cultures a contribué à faire augmenter sensiblement la demande et la consommation d'eau dans les régions de cultures en vergers.

D'autres changements importants sont survenus dans la gestion des terres. Les pratiques de travail du sol font appel à des méthodes physiques, chimiques ou biologiques pour optimiser les conditions pédologiques et favoriser la croissance des plantes (voir Opara-Nadi, 1993 pour un survol des définitions). Depuis 1991, le Recensement de l'agriculture évalue les pratiques de travail du sol au Canada en fonction de six variables. Celles-ci incluent les superficies en culture préparées en vue de l'ensemencement par des méthodes traditionnelles, de conservation et sans labour, ainsi que les superficies mises en jachère où l'éradication des mauvaises herbes se fait par le travail du sol, par l'application de produits chimiques accompagnée d'un travail du sol, ou par la seule application de produits chimiques (Huffman et Eilers, 2010). Dans ce contexte, le *travail du sol traditionnel* fait référence aux terres en culture qui sont préparées pour l'ensemencement en retournant la première couche de 15 à 20 centimètres de terre, en enfouissant les résidus de végétaux et en soumettant le sol à un procédé de labourage secondaire qui brise les agrégats et produit une couche de semis uniforme. *Le travail du sol axé sur la conservation* consiste à briser les mottes et à éliminer les mauvaises herbes mais sans retourner le sol, tandis que les méthodes de *travail du sol sans labour* conservent tous les résidus de végétaux sur la surface du sol (Huffman et Eilers, 2010).

En 2011, les méthodes de travail du sol sans labour ont été employées sur 56,4 % de la superficie préparée en vue de l'ensemencement au pays, en hausse par rapport à la proportion de 46,4 % observée en 2006. « Les systèmes sans travail du sol prédominent dans les Prairies, où la grande taille des exploitations agricoles et les sols propices à l'érosion améliorent les avantages environnementaux et financiers de l'ensemencement à passage unique » (Statistique Canada, 2012). Cependant, d'autres régions commencent à adopter plus largement cette pratique. Ainsi, au Québec, la superficie préparée sans labour a doublé à environ un demi-million d'acres, tandis que le nombre d'exploitations agricoles où l'on pratique une méthode de préparation du sol sans labour a grimpé à 69,0 %. Certaines cultures et caractéristiques du sol obligent encore à recourir à des méthodes de labour classiques dans certaines régions. Néanmoins, en 2011, ces méthodes ont reculé de 19,0 % pour l'ensemble des terres préparées en vue de l'ensemencement, soit une diminution de 30,9 % depuis 2006 (Statistique Canada, 2012).

Les pratiques de travail du sol, l'utilisation connexe de machines lourdes (et la période où elles sont utilisées) ont une incidence sur le cycle de l'eau sur les terres cultivées parce qu'elles peuvent modifier la structure du sol et l'accumulation de neige et, partant, la quantité et la qualité de l'eau de ruissellement et de recharge des nappes d'eaux souterraines (Boardman, 1995; Boardman *et al.*, 1994; Bronstert *et al.*, 2002; Evrard *et al.*, 2007; Pomeroy *et al.*, 1993). À titre d'exemple,



un sol nu (où il n'y a pas de résidus de végétaux) a moins de chance de conserver la neige et est plus exposé à l'érosion éolienne et hydrique et à la dégradation, ce qui entraîne une baisse de fertilité et des changements dans le taux d'humidité du sol, les processus de ruissellement et le transport des nutriments (Huffman et Coote, 2010). Les pratiques de travail du sol classiques, qui enfouissent la majorité des résidus de culture dans le sol, augmentent le risque d'érosion, tandis que les pratiques axées sur la conservation et sans labour, même si elles ne conviennent pas à toutes les cultures, permettent de maintenir une plus grande partie des résidus de végétaux sur la surface du sol et de réduire ainsi l'érosion et le ruissellement de surface au minimum (Huffman et Coote, 2010). Les chaumes laissés sur place durant l'hiver sur les terres consacrées à la culture des céréales et des oléagineux peuvent servir à capter la neige poussée par le vent; dans les Prairies, cela peut accroître jusqu'à quatre fois le potentiel d'infiltration dans le sol à la fonte des neiges en comparaison avec les champs mis en jachère où la plus grande partie de la neige est perdue par érosion (Pomeroy et Gray, 1995; Steppuhn, 1981). Un travail du sol minimal, qui permet de développer les macrospores du sol, facilite l'infiltration dans les sols gelés et accroît ainsi de façon substantielle la reconstitution de l'humidité dans le sol à la fonte des neiges aux endroits où la gestion de la neige est pratiquée (Gray *et al.*, 2001). En fait, entre 1991 et 2006, une plus grande sensibilisation aux avantages de la conservation des sols, accompagnée d'une meilleure disponibilité du matériel ne nécessitant pas de labour, a permis de faire doubler l'adoption des pratiques de travail du sol axées sur la conservation (procédés de conservation et de travail du sol sans labour) (Huffman et Eilers, 2010). L'évolution vers les semis sans travail du sol reflète en partie l'abandon progressif de la pratique de la mise en jachère des terres (Statistique Canada, 2009) : la proportion des terres en jachère entretenues par un travail du sol a diminué de 27 % durant cette période, tandis que les méthodes de labour réduit ont reculé de 7 % et que les méthodes sans labour (utilisation de produits chimiques seulement) progressaient de 34 % (Huffman et Eilers, 2010).

Dans l'ensemble, les pratiques de culture et de travail du sol ont une influence significative sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau sur les terres cultivées, et le Canada évolue vers l'adoption de meilleures pratiques. Cependant, ces effets sont complexes, avec des avantages liés à l'emplacement et certains inconvénients, qui ne sont encore que partiellement compris, notamment à l'échelle pertinente pour la gestion des rivières et des nappes d'eaux souterraines. Par conséquent, le comité d'experts insiste sur la nécessité de réaliser d'autres études pour mieux comprendre et quantifier les effets quantitatifs et qualitatifs de ces tendances récentes dans les pratiques de gestion des terres agricoles sur les systèmes d'eaux de surface

et d'eaux souterraines. Une meilleure compréhension revêt une importance critique pour élaborer d'autres pratiques de gestion qui concourront à la durabilité des cultures agricoles (Elliott et Efetha, 1999; van der Kamp *et al.*, 2003).

### **Impact de la gestion des terres agricoles sur le risque d'inondation**

Le défrichage, allant parfois jusqu'à la déforestation, et l'expansion des activités de drainage, qui visent dans les deux cas à soutenir l'utilisation des terres agricoles, ont eu un impact profond sur la nature et la fréquence des inondations dans le monde (voir, par exemple, Mainville *et al.*, 2006). En outre, les effets de l'intensification de la gestion des terres agricoles sur le risque d'inondation sont de plus en plus préoccupants. Bien que la documentation internationale sur cet aspect soit limitée, des études récentes au Royaume-Uni ont montré que les changements dans les profils de culture et l'emploi croissant de machines lourdes sont associés à une dégradation de la structure du sol et à des changements dans les processus de ruissellement. L'expression « inondations boueuses » est apparue pour décrire l'augmentation du ruissellement de surface en provenance de terres arables (Boardman, 1995; Boardman *et al.*, 1994). Dans les hautes terres de pâturages, les pratiques intensives ont permis une amélioration des opérations agricoles sur des sols mal drainés et des densités de stockage beaucoup plus élevées. Parmi les effets négatifs, il y a la compaction de la surface, l'augmentation de l'écoulement en surface et l'intensité accrue du ruissellement provenant des champs et des bassins de captage. Alors que l'adoption de pratiques plus durables ces dernières années a mené à une amélioration rapide de la structure des sols (Marshall *et al.*, 2009), une question importante touche la quantification des effets à l'échelle locale et régionale. Au Royaume-Uni, les simulations ont montré que ces changements dans les pratiques agricoles pouvaient avoir des effets importants sur les crues en provenance des champs et des petits bassins de captage lors des inondations de faible intensité (Ballard *et al.*, 2011; Bulygina *et al.*, 2009, 2011; Wheeler et Evans, 2009). Cependant, dans les grands bassins hydrographiques et dans le cas des événements de grande amplitude où la gestion du risque d'inondation est importante, les effets ont été modestes (des changements dans les débits de pointe de 5 % ou moins). Il semble probable que ce résultat puisse s'appliquer à un large éventail de milieux, mais des recherches sont requises pour étayer une telle affirmation. Il faut noter également que si la possibilité que des événements de grande amplitude aient de fortes répercussions sur le risque d'inondation est plutôt limitée, les mesures de conservation employées comportent clairement de nombreux avantages, y compris la réduction de l'érosion et de la sédimentation, l'augmentation de la qualité de l'eau et la conservation des habitats.

Au Canada, les vastes inondations survenues dans les Prairies en 2011 offrent un bon exemple du risque de crues graves et chroniques. Cependant, la mesure dans laquelle le drainage agricole a eu une influence sur ce risque demeure une question non résolue. Les résultats d'une étude récente sur un bassin de captage, celui du ruisseau Smith en Saskatchewan, incitent à penser que, dans le cas des crues extrêmes, si les débits maximaux ne semblent pas avoir augmenté, les volumes de crues s'écoulant en aval sont indéniablement plus élevés (Pomeroy *et al.*, 2010). Cependant, il serait téméraire de généraliser à partir d'une seule étude de cas, et le comité d'experts est arrivé à la conclusion que même si les conséquences des crues et le lien fondamental entre les pratiques de gestion des terres agricoles et le risque d'inondation sont reconnues – et observées –, la compréhension détaillée des processus et des conditions qui déterminent les caractéristiques des crues au Canada est limitée et les données requises pour évaluer les risques d'inondation sont faibles.

De façon plus générale, dans la plupart des milieux agricoles au Canada, le remplacement de la végétation indigène par des cultures saisonnières commerciales a entraîné une redistribution de l'accumulation de neige, réduit globalement le couvert végétal et exposé les sols. En outre, l'amélioration du drainage a créé des conditions qui accélèrent la transmission des eaux de surface et des eaux souterraines peu profondes dans les réseaux de canaux de drainage. Ces conditions ont accentué le volume et le débit maximal du ruissellement de surface, entraînant une augmentation des dommages causés en aval par les inondations, une érosion des canaux et une turbidité et une dégradation de la qualité de l'eau dans son ensemble (Faulkner, 2010).

L'évaluation et la gestion du risque d'inondation sont devenues un enjeu majeur au Canada. En 2011 seulement, le coût des dommages et des perturbations causés par les inondations printanières au Manitoba a dépassé 800 millions de dollars (Province du Manitoba, 2011). La situation ira probablement en s'aggravant alors que les effets du changement climatique continueront de se faire sentir. Certaines pistes de recherche centrées sur le travail du sol, le couvert végétal, les bandes de protection riveraines et de nouvelles stratégies de drainage de surface pourraient aboutir à des solutions permettant d'atténuer les effets des pratiques agricoles sur les caractéristiques des crues et protéger les terres agricoles contre les effets des inondations (Wheater *et al.*, 2008). Les terres agricoles pourraient aussi servir à stocker l'eau dans des plaines inondables lors d'événements extrêmes. En outre, on voit apparaître de nouveaux outils de modélisation et une meilleure compréhension des données requises pour appuyer la capacité prévisionnelle des méthodes de gestion durable des eaux agricoles (Wheater et Evans, 2009). Il importe d'établir des sites d'études pilotes dans des sous-bassins hydrographiques où ces problèmes

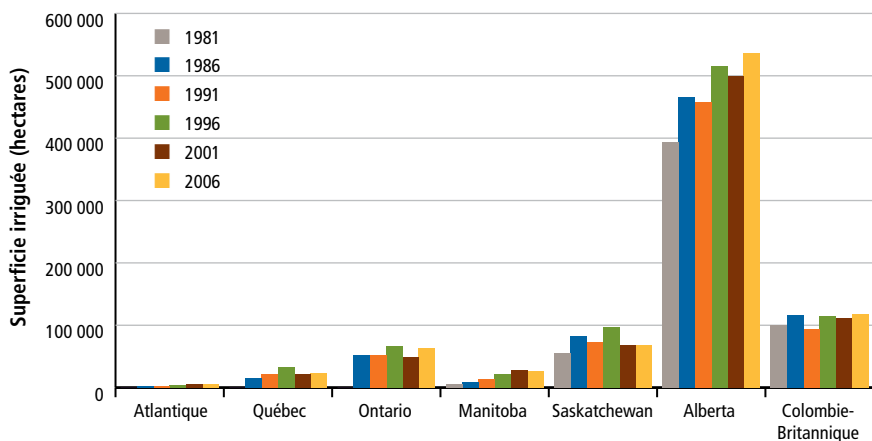
peuvent être étudiés dans leur contexte naturel et à une échelle intégrée. Le comité est arrivé à la conclusion que des recherches supplémentaires et l'accès à des données dans ces domaines pour appuyer la conception de méthodes de gestion plus efficaces du risque d'inondation auront une importance critique pour articuler des stratégies globales de gestion durable de l'eau sur les terres agricoles.

#### **4.2 LA GESTION DE L'EAU DANS LE SOL : IRRIGATION ET DRAINAGE**

Partout dans le monde, la production agricole a largement bénéficié de la gestion technique de l'eau en surface et près de la surface. Les pratiques d'irrigation et de drainage visent à régulariser dans le temps et en volume l'humidité présente dans le sol afin d'optimiser la production et la qualité des cultures et d'améliorer les opérations agricoles sur le terrain. Dans les régions où les précipitations sont insuffisantes ou marginales, l'irrigation a joué un rôle essentiel dans le développement de l'agriculture, mais elle est aussi employée pour accroître le rendement et la qualité des cultures. Elle requiert souvent un investissement dans des installations de drainage pour contrôler la hausse du niveau et de la salinisation de la nappe d'eau souterraine. Le drainage est également nécessaire pour contrôler la quantité d'eau dans le sol dans les régions où le climat est humide et/ou la « compaction » des sols les rend vulnérables à l'engorgement.

Les pratiques d'irrigation représentent la plus importante utilisation consommatrice gérée de l'eau dans la plupart des régions du monde et, en règle générale, elles ont un impact significatif sur la disponibilité de l'eau à l'échelle régionale, dont elles dépendent entièrement (UNESCO, 2012). Ainsi, 70 % des prélèvements d'eau dans les rivières, les lacs et les nappes d'eaux souterraines dans le monde servent à l'agriculture irriguée (UNESCO, 2012), ce qui équivaut à entre 80 et 90 % des utilisations consommatrices (Foley *et al.*, 2011). Au Canada, l'intensité des travaux d'irrigation dépend de la géographie mais, dans l'ensemble, le recours à ces méthodes a augmenté entre 1981 et 2006 (Poirier, 2009) (voir la figure 4.1).

Le drainage des terres est répandu dans plusieurs régions du Canada, et il est en progression (Brunet et Westbrook, 2012). Le drainage améliore les conditions du sol pour la croissance des cultures, il facilite l'accès aux terres pour les machines agricoles et il augmente la superficie des terres productives pour l'agriculture. Néanmoins, l'expansion du drainage s'est faite en bonne partie aux dépens des terres humides, provoquant une perte d'habitats et des changements dans les voies d'écoulement de l'eau, avec des conséquences possibles sur le débit des crues, la résistance à la sécheresse et la qualité de l'eau.



Source des données : Poirier, 2009

Figure 4.1

#### Évolution du nombre d'hectares irrigués, 1981-2006

Cette figure montre les différences géographiques dans les superficies irriguées par province. À noter que si les niveaux d'irrigation varient selon la région et l'année, il y a eu une augmentation nette entre 1981 et 2006. Bien que la superficie irriguée au Canada ait diminué depuis 2006, le niveau d'irrigation dépasse toujours celui de 1981 et pourrait augmenter encore dans l'avenir.

Il a été démontré que la gestion de l'eau dans le sol par l'irrigation et le drainage influait sur la disponibilité de l'eau pour d'autres utilisations anthropiques et écologiques et avait un impact majeur sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines (Rozemeijer *et al.*, 2010). Parallèlement, l'agriculture est soumise à des pressions partout dans le monde en vue de hausser les taux de production sur les terres arables existantes (Foley, 2011). Ainsi, on manifeste un intérêt considérable pour l'expansion du rôle de l'irrigation dans les régions plus sèches et l'amélioration du drainage dans les régions plus humides, une tendance qui devrait s'accroître avec l'évolution des conditions climatiques sur le territoire canadien. Cependant, nous en savons très peu actuellement sur les effets cumulatifs de l'irrigation et du drainage sur l'environnement aquatique d'une région. De plus, au-delà des questions touchant à la quantité d'eau et à la qualité de l'eau, les facteurs sociaux, économiques et politiques qui pourraient limiter le développement futur de ces pratiques sont aussi mal compris au Canada, ce qui représente une menace sérieuse pour la croissance dans plusieurs segments de l'industrie agricole canadienne. Les questions fondamentales liées à la quantité d'eau et à la qualité de l'eau que soulèvent les pratiques d'irrigation et de drainage qui influent sur la durabilité de l'agriculture canadienne et les besoins connexes sur le plan scientifique sont examinées dans les sections suivantes. Les enjeux socio-économiques sont étudiés au chapitre 6.

### Effets de l'irrigation sur la quantité d'eau

Un aspect important de l'agriculture irriguée est qu'elle se développe habituellement dans les régions plus sèches où la concurrence pour les ressources hydriques limitées peut être intense. L'eau d'irrigation tirée des nappes souterraines, des lacs et des rivières pourrait être disponible à d'autres fins. Cela n'est généralement pas le cas de la production agricole qui est tributaire des précipitations naturelles. En outre, de par leur nature, les systèmes d'irrigation redistribuent souvent de grands volumes d'eau entre les différentes composantes du cycle hydrique régional, ce qui peut influencer sur d'autres utilisations locales de l'eau. La plus grande partie de l'eau d'irrigation est « consommée » dans l'évapotranspiration des cultures<sup>29</sup>; une quantité résiduelle peut se déverser dans les eaux de surface locales sous forme d'écoulements de restitution dans les canalisations de drainage ou les fossés de surface, ou s'infiltrer au-delà de la rhizosphère pour alimenter les nappes d'eaux souterraines. Une dernière composante de l'eau irriguée est consommée lorsqu'elle est incorporée aux produits agricoles récoltés sur les terres.

L'eau prélevée pour l'irrigation dans les cours d'eau naturels comme les rivières et les ruisseaux fait souvent l'objet d'une concurrence avec d'autres utilisations humaines et peut restreindre celles-ci, notamment les activités industrielles, la production d'énergie hydroélectrique et les utilisations urbaines (ce qui peut inclure la dilution des effluents). En outre, les prélèvements à des fins d'irrigation peuvent modifier les débits au point d'affecter la santé écologique du cours d'eau (Faurès *et al.*, 2007). Pour les rivières alimentées par les précipitations, le fait que la période de pointe de la demande d'irrigation survienne normalement durant les mois les plus secs de l'année, lorsque le débit du cours d'eau est à son plus bas niveau et que les habitats aquatiques sont les plus vulnérables aux fluctuations du niveau d'eau, vient exacerber cet effet. Il en résulte une restriction potentielle de l'accès à la source d'eau au moment où celui-ci est le plus nécessaire aux fins d'irrigation. Cela n'est peut-être pas le cas des rivières alimentées par la fonte des neiges accumulées dans les montagnes, qui a tendance à connaître un sommet au début de l'été et qui peut soutenir des débits élevés jusqu'au milieu de l'été, ou encore des cours d'eau dont le régime d'écoulement est régi par des barrages ou des réservoirs.

---

29 Bien que l'évapotranspiration retourne de l'humidité dans l'atmosphère et, partant, comporte un certain potentiel de recyclage sous forme de précipitations à l'intérieur du bassin hydrographique, la plus grande partie est soustraite de l'approvisionnement régional en eau. De ce qui reste, la quantité retournée dépendra de facteurs tels que la superficie du bassin, les vents dominants, etc. (Szeto, 2008).

Lorsque des ressources d'eaux souterraines sont utilisées pour l'irrigation, plusieurs considérations surgissent en raison de leur influence possible sur la durabilité des méthodes d'irrigation par rapport à la quantité d'eau disponible. Étant donné que les périodes d'irrigation sont généralement de durée relativement courte et comportent des pointes de demande, des puits de grande capacité sont utilisés. Le pompage intensif dans ces puits peut faire baisser le niveau des nappes d'eaux souterraines, avec des répercussions graves sur les éléments en surface. Entre autres effets, il y a une réduction du débit d'alimentation des ruisseaux et des rivières à partir des nappes d'eaux souterraines et un abaissement du niveau d'eau dans les terres humides. Un point fondamental est que nous ne comprenons pas suffisamment la relation entre les prélèvements transitoires dans les nappes d'eaux souterraines et leur impact sur les caractéristiques des eaux de surface pour prendre des décisions de gestion appropriées (CAC, 2009). En outre, le volume élevé des prélèvements dans les eaux souterraines à partir de puits d'irrigation peut avoir un effet sur les ressources en eaux souterraines disponibles pour d'autres utilisateurs dans la région avoisinante. Un facteur clé qui vient compliquer l'évaluation de la durabilité des sources d'irrigation souterraines est le manque de données sur les volumes prélevés. Cela est une lacune majeure dans les données qu'il faudrait combler pour pouvoir évaluer les effets des prélèvements dans les nappes d'eaux souterraines à des fins d'irrigation.

Le cas de la rivière Saskatchewan Sud illustre de façon saisissante le fait que même si l'expansion de l'irrigation au Canada est hautement souhaitable pour accroître la productivité agricole et se prémunir contre la variabilité climatique actuelle et future, elle ne peut être envisagée en faisant abstraction d'une série de pressions concurrentes provenant des autres utilisations de l'eau, y compris les besoins de dilution des affluents et les flux environnementaux. Quelque 82 % de la consommation d'eau dans la rivière Saskatchewan Sud est attribuable à l'irrigation, principalement dans le Sud de l'Alberta (Martz *et al.*, 2007). Par conséquent, aucun nouveau permis d'utilisation de l'eau ne peut être accordé dans certains bassins secondaires de la rivière Saskatchewan Sud en Alberta (ce qui veut dire qu'aucune nouvelle demande de prélèvement d'eau n'est acceptée, sauf à certaines fins telles que les besoins des Premières Nations, la conservation de l'eau et l'amélioration des écosystèmes aquatiques) (Alberta Environment, 2006). Par nécessité, cela a suscité des améliorations dans l'efficacité de la gestion de l'eau, ainsi qu'un commerce de l'eau dans les districts d'irrigation. Cependant, ces pratiques soulèvent des problèmes dans l'optique du développement économique futur et des flux environnementaux. Des *objectifs* ont été précisés pour les flux entrant dans les cours d'eau aux fins de la gestion des ressources hydriques, mais ces objectifs paraissent bien en-deçà des *besoins* perçus (Poirier et de Loë, 2011).

L'amplitude des effets potentiels du changement climatique sur l'eau dans les systèmes agricoles continue de susciter un débat intense. Les observations récentes portant sur les conditions de variabilité climatique dans plusieurs régions du Canada et ailleurs ont permis d'entrevoir la nature de ces effets potentiels. En ce qui a trait plus directement à l'irrigation, on prévoit une augmentation de l'étendue et de la fréquence de périodes de sécheresse et une baisse des accumulations de neige, qui contribuent à reconstituer l'humidité dans le sol et à alimenter les nappes d'eaux souterraines lors du dégel printanier et qui représentent la principale source des eaux s'écoulant des montagnes Rocheuses. En raison de ces changements dans les conditions climatiques, la demande d'eau d'irrigation va probablement augmenter au moment où les flux environnementaux critiques seront à leur plus bas, ce qui exposerait la santé des écosystèmes à un risque supplémentaire. Dans les régions qui dépendent des eaux de ruissellement provenant de la fonte des neiges, on s'inquiète de la possibilité qu'un réchauffement du climat change l'amplitude et le moment où se produit la fonte des neiges, ce qui pourrait se répercuter sur la période durant laquelle l'eau sera disponible à des fins d'irrigation (Nazemi *et al.*, 2012). Les modèles climatiques planétaires projettent une hausse des températures en Saskatchewan et en Alberta, des provinces qui ont un coefficient élevé de terres irriguées au Canada. La nature des changements éventuels dans les précipitations reste incertaine, bien que l'on s'attende à une augmentation de la variabilité (Kundzewicz *et al.*, 2007; Mearns *et al.*, 2012). D'une façon ou d'une autre, ces changements accentueront les pressions sur l'industrie agricole afin qu'elle procède à une expansion des systèmes d'irrigation pour assurer une production viable (Turrall *et al.*, 2011). Ainsi, l'influence potentielle du changement climatique sur la demande d'irrigation et de drainage demeure une question de recherche fondamentale que nous devons aborder de façon prioritaire. Ce qui vient renforcer les préoccupations décrites au chapitre 2 est que tant les défis que les possibilités engendrés par le changement climatique pour l'agriculture ne peuvent être définis et évalués de manière appropriée en l'absence de données de surveillance et de la capacité d'utiliser de telles données.

### **Effets de l'irrigation sur la qualité de l'eau**

Les aspects de l'irrigation touchant à la qualité de l'eau se partagent entre deux grandes catégories : l'impact de la qualité de l'eau sur l'irrigation et l'impact de l'irrigation sur la qualité de l'eau. Dans le premier cas, l'industrie alimentaire, qui est un important acteur dans la surveillance et la gestion de la qualité des sources d'eau, montre un intérêt croissant pour l'accréditation des produits agricoles (voir l'encadré 2.3), y compris la qualité de l'eau d'irrigation. Le comité d'experts a noté que, dans certaines régions (p. ex. le Sud de l'Alberta), les pressions accrues



venant des eaux de ruissellement urbaines ont un effet néfaste sur la qualité de l'eau d'irrigation (WID, 2011). L'effet conjugué de ces facteurs engendrera un besoin accru de données sur la qualité de l'eau d'irrigation, ce qui pourrait avoir une importance critique pour que l'agriculture canadienne maintienne sa compétitivité sur le marché au moment où les demandes en vue de l'écocertification des produits s'intensifient.

Pour ce qui est de l'impact de l'irrigation sur la qualité de l'eau, deux types de problèmes se posent habituellement. En premier lieu, l'irrigation comporte généralement un écoulement de restitution vers les récepteurs d'eaux de surface grâce à un meilleur drainage. Lorsque des engrais et des pesticides sont appliqués sur les terres cultivées, les écoulements de restitution peuvent accélérer la migration de ces contaminants potentiels des champs agricoles vers les eaux de surface et les nappes d'eaux souterraines, ce qui entraîne une dégradation de la qualité de l'eau. À titre d'exemple, une étude consacrée à l'épandage du fumier sur les sols irrigués en Alberta a révélé des concentrations très élevées de nitrates dans les eaux souterraines peu profondes (avec des concentrations maximales atteignant près de 10 fois le seuil limite pour l'eau potable) (Olson *et al.*, 2009); celles-ci peuvent s'écouler vers les cours d'eau de surface adjacents ou emprunter les canalisations des systèmes de drainage. Une conséquence majeure est que les eaux réceptrices pourront devenir inutilisables pour les systèmes d'irrigation en aval à cause des taux élevés de divers contaminants.

En second lieu, l'utilisation à long terme de l'irrigation dans certaines parties du monde a été associée à une dégradation de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines dans le voisinage des terres irriguées et en aval, notamment là où les nappes d'eaux souterraines situées près de la surface ont provoqué une salinisation du sol (Dehaan et Taylor, 2002; Khan *et al.*, 2006). L'ampleur de cet effet, qui s'observe à des degrés divers partout dans le monde, a tendance à progresser lentement (Khan *et al.*, 2006).

Au Canada, plus d'un million d'hectares de terres dans les provinces des Prairies (Manitoba, Saskatchewan et Alberta) ont été jugés vulnérables à un risque de salinisation grave des sols allant de modéré à élevé (Wiebe *et al.*, 2006). L'irrigation peut accélérer l'écoulement des minéraux naturels des eaux de la sous-surface peu profonde vers les systèmes d'eaux souterraines, entraînant des concentrations accrues de sels près de la surface de la nappe. Cela peut augmenter la salinité du sol par deux mécanismes. Dans la plus grande partie des terres irriguées, on a observé que le niveau des nappes d'eaux souterraines avait tendance à augmenter sous l'effet des taux élevés de recharge des eaux souterraines dûs à l'infiltration. Les sels accumulés sous la rizosphère sont dissous à nouveau

dans les eaux souterraines dont le niveau s'élève. Ces sels se combinent à ceux véhiculés par le processus d'irrigation et entrent dans la couche peu profonde du sol et la rizosphère, ce qui entrave sérieusement la croissance et la productivité des récoltes (Wiebe *et al.*, 2006). En outre, les sels qui pénètrent dans la nappe d'eau souterraine migrent vers les points locaux de décharge où ils se concentrent par évaporation, ce qui contribue à une concentration progressive des sels provenant du sol dans la sous-surface peu profonde (Wiebe *et al.*, 2010).

Le rôle de l'irrigation dans la dégradation des eaux de surface et des eaux souterraines au Canada est généralement très mal compris et documenté. Les effets néfastes varient dans l'espace et dépendent des propriétés du sol; des problèmes ne se posent peut-être pas dans les sols bien drainés, mais de sérieux problèmes risquent de surgir dans les sols mal drainés. Si l'on considère les effets économiques dévastateurs que ces effets ont eu ailleurs dans le monde (voir Jolly *et al.*, 2001, pour un exemple en Australie), une amélioration de la surveillance et de l'évaluation sur le terrain est essentielle pour déterminer l'ampleur actuelle et future de ces menaces pour la qualité de l'eau à l'échelle régionale, notamment dans les Prairies où l'intensité de l'irrigation ira vraisemblablement en augmentant.

### **Amélioration du drainage**

Le drainage des terres agricoles a été un facteur clé dans l'ouverture de nouvelles terres arables et le maintien de la productivité des cultures dans les régions plus humides. Partout au Canada, l'amélioration du drainage de surface pour l'utilisation des terres à des fins agricoles a été abondamment pratiquée (Van der Gulik *et al.*, 2000). Considérant l'importance des superficies en cause, les modifications au drainage naturel dans les territoires agricoles peuvent avoir un impact sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau à l'échelle du bassin hydrographique. Ainsi, dans les provinces des Prairies, des préoccupations ont été exprimées au sujet de la perte de terres humides et des changements subséquents dans la connectivité hydrologique (Pomeroy *et al.*, 2010). Le comité d'experts tient toutefois à souligner que, même si les procédés physiques associés à une amélioration des activités de drainage sont bien compris et employés à des fins de conception, les effets cumulatifs à l'échelle locale et régionale sont peu documentés à cause d'un manque de données et d'études à l'appui. Le comité note également que le contrôle réglementaire et la gouvernance des travaux de drainage ne sont pas uniformes d'un endroit à l'autre au Canada.

Les améliorations dans le drainage des terres sont généralement obtenues en dégagant et en élargissant les canaux naturels et en excavant des réseaux de fossés peu profonds qui permettent à l'eau de s'écouler vers ces canaux naturels et en installant des tubes perméables ou des canalisations de drainage dans la

sous-surface peu profonde. Le but est d'accélérer l'écoulement des eaux excédentaires qui se trouvent en surface ou près de la surface lors du dégel printanier et des précipitations abondantes, de faciliter l'accès aux champs pour les travaux de culture et de contrôler le niveau de la nappe d'eau souterraine pour permettre une croissance optimale des cultures. L'importance de tous ces éléments qui améliorent le drainage des terres agricoles canadiennes est examinée ci-dessous.

### Effets du drainage sur l'environnement

La destruction des terres humides naturelles imputable à l'amélioration du drainage des terres agricoles est un phénomène reconnu à l'échelle mondiale (Verhoeven et Setter, 2010). Cette situation persistera vraisemblablement alors que la demande de terres agricoles continue d'augmenter. Les effets de ces pratiques sont notamment une perte d'habitats fauniques, ce qui pourrait avoir une incidence sur la diversité des espèces (Dahl et Watmough, 2007). L'ampleur de ces effets et leurs conséquences à long terme pour la santé et la durabilité des écosystèmes sont mal comprises. Parallèlement, la valeur que la société accorde aux habitats fauniques et à la diversité des espèces devient un facteur d'importance cruciale dans la gestion à long terme des bassins hydrographiques. Cependant, nous n'avons pas encore une compréhension suffisante, reposant sur des bases scientifiques, de plusieurs processus de contrôle essentiels pour gérer le drainage agricole de manière à atténuer ces effets.

Les zones de terres humides conservent l'eau et contribuent ainsi à réduire les risques d'inondation en aval tout en fournissant un certain degré de résilience aux sécheresses. Les données historiques semblent indiquer que les Premières Nations protégeaient les castors en raison de leur rôle dans la création de terres humides qui fournissaient l'eau nécessaire à la migration des bisons dans les périodes de sécheresse (Marchildon, 2009). Les terres humides jouent aussi le rôle de réservoirs naturels pour les nutriments qui se déplacent dans le système hydrologique peu profond grâce à une combinaison de procédés d'atténuation chimiques et biologiques (Cey *et al.*, 1999). Lorsqu'il y a réduction ou suppression de terres humides, le territoire perd une partie de sa capacité naturelle d'absorption des nutriments excédentaires provenant de la surfertilisation des cultures. Cela peut entraîner une augmentation des résidus de nutriments dans la sous-surface peu profonde et une dégradation subséquente de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Des études récentes menées dans le Sud de la Saskatchewan ont montré les effets du drainage artificiel des mares dans les prairies sur l'équilibre eau-nutriment (voir, par exemple, Pomeroy *et al.*, 2010). La valeur intrinsèque des zones de terres humides pour le maintien d'un équilibre durable des nutriments dans les territoires agricoles n'a pas encore pu être quantifiée, et cette question devrait faire l'objet de recherches supplémentaires.

### Effets du drainage sur la qualité de l'eau

Les stratégies d'amélioration du drainage ciblent naturellement les eaux peu profondes, soit celles qui ont souvent les plus fortes concentrations de produits agrochimiques en milieu agricole (Rozemeijer *et al.*, 2010). Une préoccupation particulière est la capacité des réseaux de fossés et de canalisations de drainage d'évacuer rapidement les eaux de ruissellement qui s'écoulent en surface et près de la surface et les eaux souterraines peu profondes vers les grands éléments récepteurs comme les ruisseaux et les lacs. Les canalisations de drainage recueillent essentiellement l'eau du sol et les eaux souterraines peu profondes pour les diriger vers les canaux d'évacuation de surface et ainsi maintenir la nappe d'eau sous la terre cultivée à un niveau propice à la santé des cultures et permettant l'accès sécuritaire des véhicules. Une partie des nutriments et des pesticides excédentaires qui traversent la rhizosphère pour se retrouver dans la nappe d'eau souterraine peut pénétrer dans les plans d'eaux de surface adjacents par le système de drainage installé sous la surface. Ainsi, on a constaté que les eaux de surface en aval montraient des niveaux élevés de nutriments et de turbidité (Rozemeijer *et al.*, 2010). Les flux chroniques de nutriments dans les canalisations de drainage servant à recueillir l'eau de surface ont entraîné une eutrophisation des plans d'eau de surface locaux et une surcharge en nutriments continue des plans d'eau situés en aval (Howarth *et al.*, 2011).

Le réseau de canalisations de drainage a tendance à réagir rapidement aux événements climatiques extrêmes comme les précipitations et la fonte des neiges, ainsi qu'à l'épandage d'engrais liquides tels que les boues de fumier (Frey *et al.*, 2012). Lors de tels événements, des concentrations élevées de contaminants sont souvent transportées par les canalisations vers le système de drainage des eaux de surface. Cela représente une menace pour la qualité des eaux de surface et influe sur la santé du milieu aquatique et des récepteurs situés en aval (AAC, 2010b). Malgré la prévalence et l'expansion continue des systèmes intégrés de canalisations de drainage et de canaux de drainage de surface – seulement en Ontario, plus de 45 % des terres arables disposent de canalisations de drainage –, les répercussions actuelles et futures sur la qualité de l'eau, ce qui pourrait être un facteur important dans la dégradation de la qualité de l'eau à l'échelle régionale dans les territoires agricoles, sont mal comprises. C'est là un domaine prioritaire où des recherches scientifiques supplémentaires s'imposent.

### 4.3 LES PRATIQUES DE GESTION BÉNÉFIQUES

Après avoir présenté au chapitre 3 les effets préjudiciables possibles de l'agriculture sur la quantité et la qualité des ressources hydriques et la santé des écosystèmes aquatiques, et traité dans les sections qui précèdent des problèmes particuliers liés

à l'utilisation des terres et aux changements dans la gestion des terres, y compris l'irrigation et le drainage, le rôle potentiel de l'agriculture pour atténuer ces effets et préserver et améliorer la qualité de l'environnement est examiné ci-dessous. Non seulement la durabilité à long terme de l'agriculture dépend-elle du maintien d'écosystèmes en santé, mais l'agriculture canadienne présente de vastes possibilités pour la production de biens et de services écosystémiques. Devant une meilleure compréhension des effets préjudiciables éventuels, le secteur agricole canadien applique ce qu'il est convenu d'appeler des pratiques de gestion bénéfiques (ou exemplaires) (PGB) (Corkal et Adkins, 2008). Les PGB peuvent être définies comme un ensemble de méthodes pratiques, efficaces et peu coûteuses qui contribuent à atténuer au minimum les répercussions sur l'environnement d'activités telles que l'agriculture (Gouvernement de l'Alberta, 2011). La présente section examine plus en détail l'utilité et l'application des PGB au Canada, le caractère adéquat de la base scientifique canadienne pour quantifier les effets de ces pratiques sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau, ainsi que les perspectives internationales. Dans la section qui suit, les PGB sont envisagées dans le contexte de l'agriculture de conservation, en considérant le rôle de l'agriculture comme fournisseur de biens et de services écosystémiques.

Il existe un large éventail de PGB pour la culture des céréales et la production animale, dont plusieurs ont un lien avec la problématique de l'eau (MacKay et Hewitt, 2010). MacKay et Hewitt (2010) affirment que l'adoption de PGB peut favoriser une production accrue et plus fiable grâce à des améliorations au niveau de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et une plus grande résilience tant face aux sécheresses qu'à une humidité excessive; on pourrait aussi ajouter une plus grande efficacité dans l'épandage de nutriments et de pesticides, avec des avantages connexes sur les plans environnemental et économique. Les auteurs notent que parmi les principaux avantages de l'adoption de PGB, il y a la réduction de l'érosion et le maintien d'une eau propre (MacKay et Hewitt, 2010). Les stratégies ciblées reposant sur des PGB se sont aussi révélées efficaces pour préserver la qualité de l'eau dans les systèmes d'eaux de surface (Detenbeck *et al.*, 2002) et dans la prestation d'un large éventail d'avantages écosystémiques (Yates *et al.*, 2007).

L'enquête sur la gestion agroenvironnementale (EGE) de 2006 (Statistique Canada, 2007) a fait ressortir que les producteurs partout au Canada appliquaient diverses PGB pour gérer le fumier, les engrais et les pesticides, de même que pour protéger les ressources terrestres et hydriques (MacKay et Hewitt, 2010). Des pratiques de gestion des nutriments, y compris des analyses des sols, l'optimisation de la période d'épandage, l'incorporation de fumier et l'augmentation de la capacité de stockage sur la ferme, ont été adoptées dans certaines régions du pays; cependant, leurs profils de rendement demeurent essentiellement méconnus (MacKay

et Hewitt, 2010). En 2006, 34 % des exploitants agricoles cultivaient des plantes fourragères vivaces sur leurs terres vulnérables à l'érosion, 31 % disposaient de brise-vent autour de leur ferme et 20 % avaient des brise-vent autour de leurs champs. En outre, 23 % des agriculteurs avaient semé des plantes protectrices et 11 % des plantes de couverture d'hiver (MacKay et Hewitt, 2010).

De nombreux programmes gouvernementaux ont été coordonnés au Canada au cours de la dernière décennie pour faciliter le transfert de connaissances et la mise en œuvre de PGB au niveau des exploitations agricoles. À titre d'exemple, le processus de planification de ferme agroenvironnementale (PEF), géré conjointement par Agriculture et Agroalimentaire Canada et les autorités provinciales, est une précieuse source d'information et d'éducation pour les agriculteurs canadiens en leur offrant un cadre de soutien pour la mise en œuvre de PGB. En 2006, 28 % des fermes canadiennes avaient conclu une entente de PEF officielle et une autre tranche de 10 % envisageait de le faire (MacKay et Hewitt, 2010). Cependant, en raison de problèmes de confidentialité, l'évaluation détaillée de l'efficacité du programme de PEF en regard de la mise en œuvre de PGB et du rendement obtenu n'est pas disponible actuellement.

L'efficacité des PGB est examinée en détail ci-dessous, mais il importe de signaler que les données disponibles ne sont pas concluantes. Dans une étude détaillée des PGB et de la qualité des bassins hydrographiques du Sud du Manitoba, Li *et al.* (2011) ont quantifié l'efficacité des PGB à protéger la qualité de l'eau et ils ont constaté que la réduction globale des pertes de nutriments après l'adoption de ces PGB était importante. Les PGB liées à la gestion de la qualité de l'élevage étaient aussi efficaces pour protéger la qualité de l'eau (Hubbard *et al.*, 2004). Cependant, Jarvie *et al.* (2010) ont signalé l'importance de considérer des scénarios spécifiques aux sites en ce qui a trait aux types de sols, et ils ont illustré, par exemple, que les activités d'élevage intensives sur les sols argileux lourds engendraient des niveaux nettement plus élevés de phosphore total de sources diffuses dans les cours d'eau. Kemp et Michalk (2007) ont observé qu'à long terme, des niveaux économiquement optimaux de stockage pouvaient être liés à de meilleurs résultats sur le plan environnemental. Par conséquent, il semble qu'un aspect important des PGB soit la nécessité de tenir compte des conditions locales dans la conception et la mise en œuvre de ces pratiques, dont l'efficacité dépend dans une large mesure de la nature des sols, du climat et des pratiques locales de gestion des terres.

Les programmes de financement nationaux ont reconnu environ 30 PGB qui se distinguent au niveau de leur efficacité et de leur popularité (Sparling et Brethour, 2007). Les données semblent indiquer que certaines pratiques, par exemple l'agriculture sans labour, l'abreuvement hors des cours d'eau (Godwin

et Miner, 1996) et la planification de la gestion des nutriments (Hickey et Doran, 2004; Larson, 2007), sont prometteuses, tandis que plusieurs pratiques, (comme la conversion à un couvert végétal permanent et les bandes tampons) requièrent une validation supplémentaire (AAC, 2010b; Hickey et Doran, 2004). Certaines PGB sont plus couramment utilisées dans certaines régions du Canada, ce qui reflète le caractère local de la production agricole; l'amélioration des systèmes de culture comportant une perturbation de la couche inférieure du sol et l'amélioration des méthodes d'application des engrais sont des pratiques répandues dans les Prairies et de plus en plus populaires en Ontario, tandis que les agriculteurs du Canada atlantique ont amélioré le stockage du fumier, le contrôle de l'érosion et les pratiques de gestion des produits et des déchets (Sparling et Brethour, 2007). En Colombie-Britannique, les agriculteurs ont mis l'accent sur la gestion de l'irrigation, tandis que la mise en place de brise-vent et la gestion des zones riveraines sont des pratiques courantes au Québec (Sparling et Brethour, 2007).

Comme l'illustre l'exemple de l'Île-du-Prince-Édouard (voir l'encadré 4.1), la promotion des PGB par des mesures d'encouragement et des stimulants peut faciliter leur adoption et renforcer la collaboration et la participation des intéressés. Cependant, la capacité de ces pratiques de réduire le risque environnemental et d'améliorer les conditions du milieu pourra varier selon l'emplacement des champs, ce qui complique sérieusement la tâche de faire une synthèse de l'efficacité des PGB à l'échelle nationale (Easton *et al.*, 2008; Gitau *et al.*, 2005; Sharpley *et al.*, 2009).

#### **Encadré 4.1**

#### **Île-du-Prince-Édouard : la transition d'une approche législative à une approche axée sur les PGB**

L'Île-du-Prince-Édouard est la plus petite province canadienne, avec une superficie de 5 660 km<sup>2</sup> et une population de 145 900 résidents qui dépendent entièrement d'une nappe d'eau souterraine pour leur approvisionnement en eau douce. La taille restreinte de l'île permet l'application de réformes à la grandeur de la province et facilite la surveillance de la contamination des eaux. L'Île-du-Prince-Édouard a reconnu pour la première fois le besoin de procéder à une réforme de sa politique agricole à la fin des années 1990, lorsque les effets néfastes de certaines pratiques agricoles (p. ex. la contamination par les pesticides et les engrais) est apparue clairement. En 1999, il y a eu huit incidents de destruction de poissons enregistrés à cause de la contamination de l'eau par les pesticides, alors qu'il n'y en avait eu qu'un seul l'année précédente (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et

*suite à la page suivante*

de la Forêt de l'Île-du-Prince-Édouard, 2011). Les incidents de destruction de poissons ont soulevé de sérieuses inquiétudes parmi le public et mis en évidence que la pêche sportive était exposée à un risque. Les données indiquaient que la contamination était imputable à des pesticides ayant adhéré à des particules de sol dans les eaux de ruissellement. Plus récemment, l'attention s'est tournée vers les fortes concentrations de nitrates dans les eaux souterraines liées à l'utilisation d'engrais dans la production des pommes de terre. Les nitrates peuvent comporter un risque pour la santé humaine lorsque leur concentration dépasse le seuil maximal acceptable de 10 mg/L NO<sub>3</sub>-N (Santé Canada, 2010).

À la fin des années 1990 et au début des années 2000, on s'est attaqué au besoin d'apporter des changements par une approche législative, plusieurs lois ayant été adoptées pour inciter les agriculteurs à adopter des pratiques plus écologiques afin de protéger les eaux souterraines, de prévenir l'érosion des sols et d'améliorer la biodiversité. Parmi ceux-ci, il y a eu les modifications apportées à la *Loi sur la protection de l'environnement*, déposées en 1999, qui imposaient une zone tampon de 10 mètres et des zones de conservation de 50 mètres de largeur. Des restrictions limitant la culture en rangée sur les terrains en forte pente ont aussi été mises en place, de même qu'une législation traitant de la rotation des cultures, qui limitait la culture des pommes de terre sur une parcelle à une année sur trois. Bien que certaines mesures incitatives figuraient dans cette approche législative, les lois se sont révélées impossibles à appliquer parce que le gouvernement n'avait pas les ressources nécessaires pour exercer une surveillance sur chaque culture pratiquée dans l'île. Cette approche a aussi fait monter la tension dans les rapports entre le gouvernement et les producteurs, ces derniers se sentant directement visés.

Au milieu des années 2000, on a délaissé progressivement l'approche législative au profit d'une approche axée sur les PGB, qui privilégiait des mesures d'encouragement plutôt que des peines. Le Programme de gérance agricole Canada-Île-du-Prince-Édouard a été mis en place en 2006 dans le but d'aider les agriculteurs à améliorer leur exploitation en leur fournissant un soutien technique et financier. Pour participer, les agriculteurs doivent avoir mis en place un plan environnemental à la ferme (PEF), complété ou mis à jour au cours des cinq années précédentes. Le PEF fournit une évaluation environnementale des activités en vue de préciser les domaines d'amélioration prioritaire. Les 40 PGB incluses dans le Programme de gérance ont une vaste portée, allant de l'installation d'unités de localisation GPS sur les tracteurs, à l'achat d'épandeurs de fumier améliorés, à la plantation de haies-clôtures et de zones tampons. Des modifications ont été apportées au programme pour faire en sorte que les détaillants ne profitent pas de ces changements et que ce soit les agriculteurs qui en récoltent les avantages. Ces derniers peuvent recevoir entre 6 000 et 35 000 dollars par projet, selon la nature des PGB, pour une enveloppe maximale de 50 000 dollars sur une période de quatre ans



(Canada-Île-du-Prince-Édouard, s.d.). Le programme, qui a été renouvelé en 2009 et devrait se prolonger jusqu'en 2013, reçoit entre 200 et 250 demandes annuellement. Une autre mesure d'incitation financière liée aux PGB est offerte par le biais d'une réduction des primes d'assurance-récolte; en 2010, les producteurs ont obtenu un rabais de 6 % sur leur prime d'assurance-récolte s'ils participaient à une PGB axée sur la planification de la gestion des nutriments et avaient acheté de la chaux pour au moins le tiers de la superficie assurée.

Les expériences à l'Île-du-Prince-Édouard ont démontré qu'une approche essentiellement législative ne suffit pas à apporter les changements voulus dans les pratiques agricoles requises pour protéger la qualité du sol, la qualité de l'eau et les habitats fauniques dans la province. Une approche holistique qui comprend un soutien pour les PGB, des mécanismes de conformité souples et des mesures de sensibilisation s'est révélée plus efficace pour produire des changements positifs pour l'environnement dans les pratiques agricoles.

Le comité d'experts note qu'une autre leçon importante à tirer de l'expérience de l'Île-du-Prince-Édouard est que, même si l'adoption de PGB a été impressionnante et qu'il y ait des indications que ces interventions ont été couronnées de succès, les preuves scientifiques permettant de quantifier les effets à l'échelle régionale sont inexistantes dans la plupart des cas.

### Évaluation des PGB

Le comité d'experts estime que pour garantir un rendement économique, environnemental et social suffisant sur l'investissement, l'efficacité des PGB doit être évaluée systématiquement. Les premières études portant sur les causes des rejets non ponctuels de nutriments et leurs effets sur les cours d'eau de surface – plus précisément dans le bassin des Grands Lacs – sont dérivées des vastes travaux réalisés dans les années 1970 par le Pollution from Land Use Activities Reference Group (PLUARG) (PLUARG, 2010). Les résultats de ces travaux ont illustré clairement la complexité inhérente aux rejets de nutriments des activités agricoles et ont démontré le potentiel initial des mesures pouvant être adoptées pour atténuer les effets sur la qualité des eaux de surface sur les terres agricoles, parmi d'autres utilisations du territoire. Ce programme a été suivi du Programme d'amélioration du milieu pédologique et aquatique (PAMPA) (PAMPA, 2010), mis en œuvre en collaboration par AAC et l'Ontario au milieu des années 1980. Ce programme portait directement sur des stratégies visant à réduire les rejets de phosphore dans le lac Érié en provenance des champs agricoles par l'adoption de mesures de conservation des sols et d'approches connexes axées sur des PGB. AAC et Environnement Canada ont commencé à évaluer les PGB dans un

cadre élargi en 2004, dans des programmes tels que l'Initiative sur les normes agroenvironnementales nationales (INAEN) (Environnement Canada, 2010b) et le projet Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH) (AAC, 2010b). Ces programmes ont aidé à comprendre l'efficacité des PGB pour toute une gamme de pratiques et ils ont éclairé le choix des PGB en vue de respecter les normes environnementales. Un indice d'adoption des PGB a aussi été élaboré comme macro-indicateur de l'adoption moyenne de PGB dans chaque région du pays (MacKay *et al.*, 2010).

L'INAEN a aussi permis de définir des seuils idéaux et atteignables de qualité environnementale (AAC, 2008). Les normes de rendement idéales (NRI) ont servi à définir un objectif à long terme pour les niveaux souhaités de qualité environnementale, tandis que les normes de rendement atteignables (NRA) décrivaient le niveau de qualité environnementale qu'il était possible d'atteindre par l'application de PGB et/ou d'autres pratiques de gestion des terres (Environnement Canada, 2010b).

Étant donné que l'atteinte d'une NRI ou d'une NRA nécessitait un effort collectif d'adoption de PGB dans une région donnée, l'INAEN a défini une approche dans le cadre du Programme national de gestion agroenvironnementale pour le choix des catégories les plus efficaces et/ou les endroits où les PGB permettraient de progresser vers un niveau idéal de qualité de l'eau (Environnement Canada, 2010b). Toutefois, l'INAEN devait guider le choix des PGB mais ne disposait pas des instruments ou des paramètres de mesure nécessaires pour évaluer le succès et les effets à long terme de l'application des PGB à l'échelle du bassin hydrographique. En revanche, le projet EPBH visait expressément à évaluer les effets de certaines PGB sur la qualité de l'eau, qui reflète souvent d'autres indicateurs environnementaux (c.-à-d. la qualité du sol et de l'air et la biodiversité). Ciblant neuf petits bassins hydrographiques au Canada (d'une superficie variant d'environ 300 à 2 500 hectares), chaque EPBH comportait les volets suivants (AAC, 2010b) :

- des évaluations biophysiques pour mesurer les effets sur l'environnement;
- des évaluations économiques pour évaluer les coûts et les avantages de la mise en oeuvre des pratiques;
- la modélisation hydrologique pour évaluer le transport des contaminants et les effets potentiels de l'application des PGB à l'échelle du bassin hydrographique.

La combinaison des considérations hydrologiques et économiques a aussi été intégrée à un outil de soutien pour les décisions de planification à long terme des bassins hydrographiques : des cadres de modélisation intégrée ont été élaborés pour des sites pilotes au Manitoba et au Québec, et les autres sites devaient suivre la même voie (AAC, 2010b). Un tableau détaillé des PGB par bassin hydrographique dans le cadre du programme EPBH est présenté ci-dessous (tableau 4.1).

Tableau 4.1

## PGB par bassin hydrographique

EPBH		CB	AB	SK	MB	ON	QC	NB	NE	IPÉ
PGB		RS	RLLB	RP	RST/S	SN	BH&F	BB	TB	RS
ZOE RIVERAINE	Clôture pour éloigner le bétail (et l'abreuvement hors des cours d'eau)	X	X			X			X	
	Abreuvement hors des cours d'eau sans clôture		X							
	Gestion de la végétation riveraine				X					X
DANS LES CHAMPS	Gestion des nutriments / intrants (engrais commercial / fumier)		X	X			X		X	
	Travail du sol / gestion des résidus de culture				X		X			X
	Rotation des cultures						X			
	Couvert végétal vivace			X	X					
	Utilisation réduite d'herbicides						X			
	Pâturage d'hiver sur fourrage en balles			X	X					
	Efficacité de l'irrigation	X								
RUISSELLEMENT/DÉVERSEMENT	Terrasses de diversion et voies d'eau herbagées							X		
	Mesures de contrôle du ruissellement de surface						X			
	Bandes tampons		X					X		
	Gestion du ruissellement provenant de la ferme								X	
	Bassin de rétention des eaux de ruissellement				X				X	
	Petits réservoirs				X					
	Restauration des terres humides			X						
	Drainage par canalisations contrôlé					X				

Source : AAC, 2011d

RS = rivière Salmon; RLLB = rivière Lower Little Bow; RP = ruisseau Pipestone; RST/S = ruisseau South Tobacco /Stepler; SN = South Nation; BH&F = Bras d'Henri et Fourchette; BB = Black Brook; TB = Thomas Brook; RS = rivière Souris.

L'évaluation la plus récente du programme EPBH a fait ressortir que, des 22 PGB examinées, 13 montraient clairement un potentiel de réduction de la charge en contaminants des eaux de surface, « [T]outefois, dans bien des cas, il restera à déterminer le taux de réussite des pratiques » (AAC, 2010b). Il est important de noter que les PGB étudiées dans le cadre du projet EPBH ont été sélectionnées de manière à tenir compte des conditions particulières de chaque bassin hydrographique et à refléter les intérêts locaux et régionaux à l'égard des PGB; le projet ne visait donc pas au départ à comparer les effets des PGB pour un large éventail de territoires et de caractéristiques des bassins hydrographiques. Le fait que certaines PGB aient été appliquées dans plus d'un bassin hydrographique a toutefois permis de faire une évaluation préliminaire des effets multi-sites et de développer des modèles pour quantifier l'effet des PGB sur le bassin hydrographique. Cependant, au-delà du manque de quantification des résultats à l'échelle locale, il importe de souligner que l'extrapolation des résultats pour produire des évaluations à l'échelle du bassin de captage et de la région est une tâche complexe. AAC (2010b) précise que l'extrapolation des effets nécessiterait une validation plus poussée à partir de données de terrain à l'échelle locale et régionale ainsi qu'un renforcement du réseau national de laboratoires à l'échelle des bassins hydrographiques en y ajoutant de nouveaux sites pour combler les lacunes perçues dans les différents territoires. Il est essentiel de souligner également que l'INAEN et l'EPBH ont ciblé presque exclusivement les eaux de surface, en accordant peu d'attention à l'influence des programmes de PGB sur les ressources en eaux souterraines. Le comité d'experts considère qu'il s'agit là d'une lacune importante qui nécessiterait un examen scientifique plus poussé et une évaluation sur le terrain.

L'industrie s'emploie aussi activement à mettre au point des PGB qui aident à atténuer l'impact négatif des activités agricoles sur l'environnement. L'épandage d'engrais, par exemple, est un domaine où l'industrie a tenté de mettre au point des PGB efficaces pour les producteurs agricoles. L'industrie canadienne cible les « 4R » associés à l'épandage d'engrais : le bon produit, le bon taux, le bon moment et le bon endroit (Rawluk et Racz, 2009) (voir l'analyse des technologies au chapitre 5). Ainsi, le développement d'un produit à base d'urée recouverte d'une pellicule de polymère vise à permettre une libération progressive des nutriments afin d'améliorer l'absorption par les plantes et de réduire les pertes par lixiviation (Hyatt *et al.*, 2010; Wilson *et al.*, 2010). Les technologies de fertilisation à dégagement lent déployées conformément au cycle de croissance de la plante offrent des avantages significatifs pour optimiser l'efficacité de l'utilisation des nutriments, en particulier dans un contexte de variabilité temporelle des conditions hydrologiques comme celle associée aux saisons au Canada. Selon l'International Plant Nutrition Institute, l'approche des 4R adoptée par l'industrie des engrais

tient compte des « dimensions économiques, sociales et environnementales de la gestion des nutriments et elle est essentielle à la viabilité des systèmes agricoles » [traduction] (International Plant Nutrition Institute, 2012).

### **Perspectives internationales sur les PGB axées sur la gestion des nutriments**

Dans de nombreuses parties du monde, on pratique depuis longtemps une gestion hautement intensive des terres agricoles et on a acquis une expérience considérable des politiques axées sur les PGB et de leur mise en œuvre. À titre d'exemple, l'Europe a fait l'expérience de l'utilisation intensive des engrais et du fumier sur de longues périodes et elle en a subi les conséquences sur le plan environnemental (Oenema *et al.*, 2009). En 1991, le Conseil des communautés européennes a adopté une directive sur les nitrates (UE, 1991) qui précise que « les nitrates d'origine agricole sont la principale cause de pollution provenant de sources diffuses dans les eaux de la Communauté européenne » [traduction]. En conséquence, des zones vulnérables aux nitrates (ZVN) ont été désignées et on a imposé des restrictions sur la quantité d'engrais et la période où ils peuvent être appliqués et entreposés (UE, 1991). Les territoires touchés représentaient une très vaste superficie, englobant 69 % des terres arables et 57 % des pâturages sous gestion en Angleterre (Johnson *et al.*, 2011).

Les avantages sur le plan environnemental de l'adoption de la stratégie des ZVN ont été irréguliers et difficiles à quantifier. Des résultats récents pour de petits bassins hydrographiques provenant de modèles à l'échelle nationale montrent que les concentrations de nitrates dans la lixiviation provenant des terres arables étaient habituellement bien supérieures à la valeur limite, même lorsque l'agriculteur appliquait les meilleures pratiques (Johnson *et al.*, 2011). Worrall *et al.* (2009) ont montré que les concentrations de nitrates dans de nombreuses rivières et nappes d'eaux souterraines en Angleterre et au Pays de Galles demeurent élevées, et ils en concluent que la réglementation actuelle n'a pas eu d'impact significatif sur les concentrations de nitrates dans les eaux de surface. Cependant, un feuillet explicatif officiel sur la Directive nitrates (2010) (UE, 2010) affirme que la Directive nitrates « s'avère efficace : entre 2004 et 2007, les concentrations de nitrates dans les eaux de surface sont demeurées stables ou ont diminué dans 70 % des sites surveillés. La qualité des eaux souterraines dans 66 % des points de surveillance est demeurée stable ou va en s'améliorant » [traduction].

Alors que l'expérience du Royaume-Uni montre qu'une importante initiative de politique nationale n'a pas encore produit de résultats convaincants en termes de réduction des concentrations de nitrates, l'EPA (2011) aux États-Unis a étudié les pratiques de gestion destinées à réduire les charges en azote réactif. Les conclusions sont prometteuses :

- L'écoulement de l'azote réactif excédentaire dans les ruisseaux, les rivières et les systèmes côtiers peut être réduit d'environ 20 % grâce à une amélioration de la gestion des terres et sans perturbation grave des activités agricoles.
- L'efficacité des cultures et de l'absorption peut être augmentée dans une proportion allant jusqu'à 25 % par rapport aux pratiques actuelles en combinant des pratiques fondées sur des connaissances et des avancées dans la technologie des engrais.
- La production des cultures peut être augmentée tout en réduisant la quantité totale d'azote réactif dans une proportion allant jusqu'à 20 % de l'azote réactif artificiel.
- Les émissions de nitrates provenant de l'élevage peuvent être réduites dans une proportion de 30 % grâce à une combinaison de PGB et de solutions techniques.

Les PGB examinées visaient notamment à créer et à restaurer des terres humides sur de grandes superficies, à mieux faire correspondre l'intensité de l'utilisation d'azote réactif aux systèmes de culture et aux caractéristiques du terrain, à améliorer les systèmes de drainage par canalisations et à créer des zones tampons riveraines. Cependant, même si l'on s'attendait à ce que ces mesures réduisent sensiblement les concentrations, la question qui se pose est de savoir quelle réduction est requise pour produire des avantages environnementaux notables. L'EPA soulignait que d'autres réductions seront probablement requises a) pour plusieurs écosystèmes sensibles à l'azote et b) pour assurer le maintien de normes sanitaires.

Une évaluation récente de l'azote dans la Communauté européenne (Sutton *et al.*, 2011) fait écho au rapport de l'EPA des États-Unis sur de nombreux points. Cette évaluation décrit trois mesures clés pour le secteur agricole :

- Une amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'azote dans les cultures (en améliorant les pratiques de gestion des champs et le potentiel génétique et en réduisant les pertes).
- Une amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'azote dans la gestion de l'élevage.
- Une augmentation de la valeur en équivalent azote du fumier animal.

Cependant, le rapport fait valoir avec insistance que, pour être efficaces, ces mesures nécessitent une politique concertée, réunissant tous les secteurs de l'économie.

Ces deux importants rapports font ressortir clairement les défis liés à la conformité aux normes environnementales pour ce qui est de la pollution provenant des nutriments, tels que perçus en Europe et aux États-Unis, mais ils montrent aussi les avantages potentiels d'un déploiement approprié de PGB. Cela souligne encore une fois le besoin vital de disposer d'une évaluation scientifique du rendement de tout un éventail de stratégies axées sur des PGB afin de pouvoir les intégrer le plus efficacement possible à un cadre national de durabilité de l'eau dans les territoires agricoles.

### Conséquences des résultats de l'évaluation des PGB pour le Canada

Même si le Canada a fait des investissements importants dans la recherche à long terme pour évaluer l'efficacité des PGB, nous ne disposons pas encore de résultats concluants. Tel que noté précédemment, l'examen le plus récent du programme EPBH soulignait que, même si plusieurs PGB montrent clairement un potentiel de réduction des charges de contaminants dans les eaux de surface « dans bien des cas, il restera à déterminer le taux de réussite des pratiques » (AAC, 2010b). En fait, selon le rapport, « [J]usqu'ici, on a uniquement démontré hors de tout doute la rentabilité au niveau de la ferme d'une des PGB étudiées dans le cadre de l'EPBH, soit le drainage contrôlé par canalisations ». De façon générale, les PGB efficaces devraient engendrer toute une série d'avantages sur le plan environnemental, mais ceux-ci ont peu de chance de se traduire en avantages économiques directs au niveau de la ferme, ce qui demeure un obstacle important à l'adoption à grande échelle de ces pratiques.

La question demeure posée: étant donné les diverses préoccupations au sujet des effets néfastes de l'agriculture sur le milieu aquatique, notamment ceux associés aux nutriments, quel potentiel offrent les PGB pour réduire ces effets au niveau des charges contaminantes? Le comité d'experts note que a) la recherche canadienne (p. ex. l'EPBH) n'est pas encore suffisamment avancée pour permettre de quantifier les effets de la majorité des PGB; b) à l'heure actuelle, nous n'avons pas d'évaluation fiable des effets des PGB à l'échelle régionale, même dans les régions où de telles pratiques ont été largement adoptées par les exploitants agricoles; c) très peu d'attention a été accordée à l'adoption et au rendement des PGB axées sur la quantité et la qualité des eaux souterraines. Ce dernier point est pertinent à l'échelle mondiale. Il y a des lacunes évidentes et importantes au niveau de la recherche. Cependant, il importe de reconnaître le délai qui survient (le temps écoulé entre l'installation ou l'adoption de mesures de gestion et les premières améliorations mesurables de la qualité de l'eau dans le plan d'eau ciblé) dans l'évaluation des PGB déployées, car une évaluation à court terme pourrait ne pas révéler de résultats significatifs (Meals *et al.*, 2010). Cela fait ressortir le besoin intrinsèque d'une suivi continu à long terme des exploitations où des PGB ont été mises en oeuvre afin de mettre au point des mesures quantifiables du rendement.

D'importantes questions de recherche en sciences sociales méritent d'être mentionnées. Une meilleure compréhension des déterminants de l'adoption des PGB pourrait faciliter leur application à grande échelle. Les travaux publiés incitent à penser que les producteurs plus scolarisés, qui possèdent de plus grandes exploitations, dont le chiffre d'affaires brut est plus élevé ou qui gagnent un revenu hors de la ferme ont une plus grande probabilité d'adopter des PGB. Cependant, ces observations ne ressortent pas uniformément de toutes les études rapportées

(Sparling et Brethour, 2007). Le fait que certains agriculteurs ne comprennent pas la nécessité des PGB (le gain économique potentiel net) malgré les incitatifs financiers offerts pourrait aussi constituer un obstacle à l'adoption de ces pratiques (Curtis et Robertson, 2003). Enfin, les coûts de transition (y compris les coûts en capital pour l'acquisition du nouveau matériel et les coûts de formation liés à l'apprentissage des PGB) pourraient aussi nuire à leur adoption (Sparling et Brethour, 2007).

Les problèmes que pose une analyse avantages-coûts des PGB sont aggravés par la difficulté de quantifier leurs effets à l'échelle du bassin hydrographique et de mesurer le rendement attendu sur l'investissement. Le projet EPBH a servi de première étape en vue de faciliter une évaluation préliminaire des effets sur des sites multiples et l'élaboration de modèles pour quantifier les effets des PGB à l'échelle du bassin hydrographique. Cependant, l'extrapolation des résultats de ces modèles nécessite une validation supplémentaire s'appuyant sur des données recueillies sur le terrain (AAC, 2010b) et une modélisation économique. Une évaluation détaillée du rendement des PGB passe aussi par l'adoption d'une approche critique permettant d'intégrer les systèmes d'eaux de surface et d'eaux souterraines ce qui, historiquement, a fait défaut au Canada et ailleurs. En outre, l'élaboration de mécanismes de gouvernance pour promouvoir l'adoption des PGB est un aspect important pour la recherche future en vue d'encourager l'utilisation des pratiques qui ont fait leurs preuves en améliorant le bilan économique, environnemental et social.

#### **4.4 NOUVELLES PERSPECTIVES POUR L'AGRICULTURE DURABLE AU CANADA – L'AGRICULTURE DE CONSERVATION ET L'APPROCHE AXÉE SUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES**

Bien que les PGB aient beaucoup à offrir pour atténuer les effets sur l'environnement, la mesure dans laquelle des gains importants peuvent être réalisés sur le plan environnemental est une question non résolue qui nécessitera des recherches plus poussées. La présente section traite de deux notions connexes : l'agriculture de conservation et l'approche axée sur les services écosystémiques. L'agriculture de conservation est une réponse aux préoccupations suscitées par le fait que les tendances actuelles vers l'intensification et la perte de diversité ont des répercussions sur la résilience des systèmes agricoles, et que les PGB peuvent être vues comme des éléments d'une vision plus large de l'agriculture durable. Cela est également lié à la notion selon laquelle l'agriculture, en tant qu'important utilisateur du territoire, a un rôle clé à jouer au-delà de la production, qui englobe la prestation d'une gamme étendue de services à la société, à laquelle les PGB peuvent faire un apport important.



### L'agriculture de conservation

Élaborée dans une perspective holistique, la notion d'agriculture de conservation peut englober un ensemble de pratiques intégrées dans une approche systémique de l'agriculture. Puisque l'agriculture a trait à la gestion de systèmes vivants et que l'agriculture durable dépend de ressources pédologiques vivantes limitées, l'agriculture de conservation pose un défi unique.

Depuis les années 1960, une bonne partie du développement agricole a porté sur des exploitations à plus grande échelle, au prix de la diversité et de l'intégration au sein de systèmes (Pretty, 2008). Les systèmes agricoles ont habituellement dissocié les cultures de l'élevage, séparant souvent dans le temps et dans l'espace les animaux des aliments qu'ils consomment, et le fumier de la terre sur laquelle il peut être utilisé (Russelle *et al.*, 2007). Les exploitations agricoles ont aujourd'hui un degré élevé d'intensité technologique, mais une faible diversité agronomique et biologique. Elles sont exposées à un risque financier important en raison d'un niveau élevé de recettes brutes et de dépenses; lorsque les rendements diminuent, le ratio du revenu net aux dépenses chute fortement, aggravant le risque financier. Ces exploitations agricoles font aussi face à de plus grands risques biologiques parce les systèmes agronomiques simples (les monocultures, par exemple) sont plus vulnérables aux attaques de la nature et ne peuvent s'adapter facilement au changement climatique (Brooks et Loevinsohn, 2011; Nazarko *et al.*, 2005).

*L'agriculture de conservation et l'agriculture axée sur des systèmes naturels* sont des expressions qui désignent des approches privilégiant l'agriculture durable. L'utilisation de ces expressions vise à attirer l'attention sur un trait particulier de ce secteur d'activité économique, à savoir que le rendement du système agricole dépend de sa capacité biologique, et que la gestion des systèmes biologiques peut poser des défis qui n'existent pas dans la gestion des systèmes mécaniques abiotiques. Les données montrent que la variation du rendement agricole imputable aux facteurs environnementaux dépasse de beaucoup la variation du rendement liée à la gestion ou au choix des cultivars (Anderson, 2010b). Cela souligne la nécessité de faire de la résilience une priorité de premier plan dans les systèmes agricoles. Les mouvements axés sur l'agriculture de conservation encouragent la création de milieux vivants sains et productifs, mais aussi résilients, robustes et capables de se rétablir d'eux-mêmes. Comme dans le milieu naturel, le principal déterminant de ces caractéristiques est la diversité (Cox *et al.*, 2004). L'intégration est également importante. Dans la perspective de l'eau, cela englobe les liens entre les utilisations urbaines et agricoles et le recyclage de l'eau (Cubillo, 2010). La diversité et la résilience des systèmes agricoles peut être atteinte par divers moyens, mais certains éléments parmi les plus communs de l'agriculture de conservation sont la rotation, la culture de légumineuses, la culture de vivaces, les systèmes d'élevage intégrés, la réduction du travail du sol et la conservation du sol.

Les sous-sections suivantes décrivent des exemples de techniques pouvant être utilisées en agriculture de conservation.

### La rotation

Au Canada, des études à long terme ont démontré la valeur de la rotation pour soutenir les systèmes de cultures. La rotation apporte une plus grande résilience et un rendement plus uniforme, tandis qu'elle soutient une plus grande vie dans le sol et aide à lutter contre les mauvaises herbes. Elles englobent notamment des travaux sur l'agriculture classique et l'agriculture organique dans la perspective du rendement et des systèmes de cultures au Manitoba (Entz *et al.*, 2002) et une synthèse plus vaste des études sur la gestion des mauvaises herbes dans la région des grandes plaines du Nord (Derksen *et al.*, 2002).

### Les légumineuses

Dans les exploitations où l'on pratique les cultures sur de grandes étendues, les engrais synthétiques à base d'azote comptent pour la plus grande partie des intrants énergétiques commerciaux nécessaires à la production d'engrais minéraux (Hoepfner *et al.*, 2006). L'inclusion dans la rotation des cultures d'espèces qui fixent l'azote pourrait modifier fondamentalement la durabilité énergétique et économique des systèmes de culture.

### Les vivaces

En grande majorité, les systèmes de cultures industrielles produisent des variétés annuelles. L'ajout de vivaces à un système de culture apporte une diversité fonctionnelle et change profondément le calendrier des activités de gestion au sein du système, ce qui comporte des avantages pour lutter contre les parasites (Nazarko *et al.*, 2005). En outre, les plantes vivaces sont plus résilientes que les plantes annuelles et elles peuvent offrir une plus grande efficacité dans l'utilisation des ressources et la capacité d'extraction (Cox *et al.*, 2010). Qui plus est, les vivaces ont un plus grand potentiel de séquestration en profondeur du carbone. Le principal défi associé à la transition vers une agriculture fondée sur les systèmes naturels est l'adoption et l'utilisation de pratiques nouvelles au sein des structures économiques et commerciales actuelles. À titre d'exemple, les rentrées de fonds posent un problème majeur dans les exploitations agricoles traditionnelles, et l'intégration d'espèces vivaces non commerciales dans un système de rotation de cultures commerciales n'est pas pratique d'un point de vue financier. Les efforts déployés par le Land Institute de l'Université du Manitoba pour développer des cultures céréalières vivaces<sup>30</sup> sont, en partie, dirigés vers la création de débouchés pratiques pour les producteurs de cultures commerciales pour qu'ils puissent accroître la diversité fonctionnelle de leurs cultures.

---

30 Voir <http://umanitoba.ca/outreach/naturalagriculture/perennialgrain.html>.

### Les systèmes d'élevage intégrés

Dans le but d'améliorer l'efficacité des cycles du carbone et du phosphore en agriculture, une certaine forme de réintégration est requise entre l'agriculture végétale et l'agriculture animale (Russelle *et al.*, 2007). Ce genre d'intégration peut soulever des problèmes sur le plan pratique, mais divers scénarios ont été employés pour examiner ces problèmes, allant de régions où l'on retrouve des exploitations d'élevage intensif à des régions de grands pâturages libres. Aucun modèle ne convient à tous ces scénarios, mais l'importance du principe de l'intégration est reconnue pour améliorer la résilience et l'efficacité des systèmes agricoles.

### Le travail réduit du sol et la conservation du sol

Au Canada, le travail réduit du sol et la notion plus vaste de la conservation des sols sont devenus des mouvements dont l'essor et le leadership proviennent entre autres d'associations d'agriculteurs (Brandt, 2009). L'attrait de ces mouvements réside à la fois dans la gérance et l'avantage comparatif (Baig et Gamache, 2009). Tel que décrit par Dumanski *et al.* (2006), les principes clés de la conservation des sols englobent :

- Le maintien d'un couvert permanent sur le sol et la réduction de la perturbation des sols afin d'augmenter l'infiltration de l'eau, d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans le sol et d'offrir une plus grande protection contre les sécheresses.
- Promouvoir des sols vivants et en santé par une rotation des cultures, l'utilisation de cultures-abris et une application efficace et limitée de pesticides. Cela encourage la biodiversité naturelle du sol et produit un sol de bonne qualité, aéré naturellement, et plus apte à recevoir, à conserver et à alimenter les plantes avec l'eau disponible.
- Nourrir le sol plutôt que de fertiliser les cultures. Cela contribue à réduire la pollution chimique, à améliorer la qualité de l'eau et à maintenir l'intégrité écologique naturelle du sol.
- Promouvoir une utilisation précise des intrants afin d'abaisser les coûts, de maximiser l'efficacité et d'atténuer les dommages causés à l'environnement. La technologie peut aider à accroître la précision, mais un diagnostic soigné du problème et la localisation exacte du traitement sont les considérations premières. Dans les petites exploitations horticoles et agricoles, cela comprend aussi la plantation d'espèces différentes sur les collines et les crêtes afin d'utiliser l'humidité présente dans le sol et de profiter au maximum des conditions d'ensoleillement.
- Promouvoir la culture de légumineuses (pour accroître l'utilisation de l'azote fixé biologiquement), le compostage et l'utilisation du fumier et d'autres méthodes d'amendement organique du sol. Ces pratiques améliorent la structure du sol, sa fertilité intrinsèque et sa capacité de rétention de l'eau tout en réduisant le risque d'érosion.

Le comité d'experts prend note du potentiel qu'offre l'agriculture de conservation pour résoudre le problème de la résilience face à l'incertitude croissante liée à la variabilité du climat et au changement climatique, et des synergies évidentes avec les PGB examinées précédemment.

### Une approche axée sur les services écosystémiques

Tel que résumé dans Bennett *et al.* (2009), les populations humaines ont investi d'importantes ressources techniques dans les écosystèmes en vue de produire de manière fiable et peu coûteuse des aliments, du bois d'œuvre et d'autres services écosystémiques (habituellement commercialisables). Pourtant, ces efforts n'ont pas prêté suffisamment d'attention aux multiples interactions complexes qui existent entre les services écosystémiques produits sur les terres agricoles (Bennett *et al.*, 2009). Cela a mené à une augmentation globale de certains services écosystémiques commercialisables, tels que les aliments et le bois d'œuvre, mais aux dépens de nombreux autres services (habituellement non commercialisables), comme la protection contre les inondations, la qualité de l'eau ou le contrôle des maladies (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). L'accent mis sur un petit nombre de services écosystémiques a même provoqué des déclin rapides d'autres services écosystémiques (Gordon *et al.*, 2008). Ces déclin soulèvent une préoccupation croissante, alors que la demande pour presque tous les services écosystémiques continue d'augmenter (Bennett *et al.*, 2009; Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Si les liens entre les services écosystémiques sont importants, notre compréhension de leurs interactions dans le contexte agricole est limitée (Raudsepp-Hearne *et al.*, 2010). Pour cette raison, les décisions en matière de gestion agricole visant à accroître l'efficacité (p. ex. une plus grande utilisation d'engrais, un recours accru à l'irrigation, des changements dans les méthodes de travail du sol, ou le stockage du fumier) entraînent souvent des pertes d'habitats et un recul de la biodiversité et des services écosystémiques non agricoles, ce qui pourrait éventuellement se traduire par une baisse de la productivité des activités agricoles parce que ces services écosystémiques sont le fondement sur lequel repose la production agricole (p. ex. le contrôle des inondations, le cycle des substances nutritives, la formation des sols). Bien que certaines interactions entre des paires de services soient bien comprises, il y a un manque d'études visant à acquérir une compréhension quantitative des effets des décisions de gestion sur plusieurs services, y compris la biodiversité et les habitats (Bennett *et al.*, 2009). Une telle compréhension a une importance critique si nous voulons évoluer vers un régime de tarification des services écosystémiques, comme ceux examinés à la section 6.2.

Des études récentes ont préconisé une analyse plus détaillée des multiples interactions non linéaires entre les services écosystémiques dans un contexte spatial afin de produire les connaissances scientifiques requises pour éviter un recul spectaculaire de certains services (Carpenter *et al.*, 2009; Kremen et Ostfeld, 2005). Bien que des chercheurs aient étudié l'état actuel et le potentiel futur des services écosystémiques (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), calculé la valeur des services fournis (Costanza *et al.*, 1997; Gallai *et al.*, 2009), projeté l'offre et la demande (Deutsch *et al.*, 2007; van Jaarsveld *et al.*, 2005) et évalué les menaces pour les services écosystémiques (Tilman *et al.*, 2001), nous n'avons pas encore une compréhension suffisante des paramètres écologiques à l'origine des liens entre la connectivité d'un territoire, la biodiversité et les services écosystémiques pour gérer efficacement un portefeuille de multiples services (Bennett *et al.*, 2009; Kremen et Ostfeld, 2005).

Cela dit, il y a de nombreux exemples à l'échelle régionale d'agriculteurs agissant en bons gérants de l'environnement et prenant soin d'un territoire qui fournit de multiples services écosystémiques. *Satoyama* est un terme japonais qui signifie le territoire situé entre les montagnes et les terres plates entièrement arables; celles-ci sont souvent gérées selon un modèle d'utilisation mixte, avec un paysage agricole très diversifié où l'on retrouve de petits villages, des forêts en gestion collective et des utilisations agricoles. Ce qu'il faut retenir est que ces territoires ont été façonnés sur de nombreuses années par les interactions des gens avec la nature. En raison de l'utilisation hautement diversifiée des terres, les *satoyama* ont souvent une grande biodiversité et offrent toute une variété de services écosystémiques. Les *satoyama* sont aujourd'hui reconnus pour leur grande valeur au Japon, et de nombreux groupes de conservation travaillent à la préservation de ces territoires menacés, y compris l'initiative *satoyama* dont la « vision fondamentale est de réaliser des sociétés en harmonie avec la nature, c'est-à-dire construites sur des rapports positifs entre l'homme et la nature » [traduction] (Ministère de l'Environnement du Japon, 2010).

En Europe, le rôle capital joué par les agriculteurs dans la gérance de l'environnement est de plus en plus reconnu. La Commission européenne a récemment publié des propositions portant sur une nouvelle stratégie de la biodiversité pour 2011 qui définit six cibles prioritaires en vue d'atteindre les objectifs de biodiversité de l'UE à l'horizon 2020. La stratégie met l'accent sur le rôle des terres agricoles, en affirmant qu'une grande partie du territoire agricole européen devrait être gérée de façon à préserver la biodiversité et les multiples services écosystémiques actuels (CAP2020, 2011).

Des exemples existent également au Canada. L'Alberta Riparian Habitat Management Society, plus communément appelée *Cows and Fish* (des vaches et des poissons), préconise une meilleure compréhension de la façon dont la gestion

des zones riveraines pourrait améliorer la santé et la productivité des terres au profit des propriétaires, des producteurs agricoles et des autres personnes qui utilisent et apprécient les zones riveraines. Ce faisant, l'organisme fait la promotion d'un territoire pouvant procurer de multiples services, y compris des possibilités de pâturage et d'élevage, la rétention des nutriments et une eau de bonne qualité, ainsi que le stockage du carbone (Alberta Riparian Habitat Management Society, s.d.). L'élaboration de la Stratégie de la biodiversité de l'Ontario a réuni plusieurs intervenants et le public dans un effort de collaboration visant à établir un plan qui répartit la responsabilité de la préservation de la biodiversité entre le public, les collectivités et les divers secteurs de la société, en dépit de la croissance prévue de la population (Conseil de la biodiversité de l'Ontario, 2005). La stratégie comporte deux grands objectifs : a) « protéger la diversité génétique des espèces et des écosystèmes en Ontario » et b) « utiliser et développer les actifs biologiques de l'Ontario de façon durable et saisir les avantages qui en découlent au profit des Ontariens » [traduction] (Conseil de la biodiversité de l'Ontario, 2005). En 2011, un troisième objectif a été ajouté : la généralisation de la biodiversité, à savoir l'intégration de la biodiversité dans les processus décisionnels (Conseil de la biodiversité de l'Ontario, 2011).

Le comité d'experts tient à souligner que les besoins de recherche particuliers pour appuyer une approche écosystémique englobent une meilleure compréhension des effets des activités agricoles sur la biodiversité. Le comité est arrivé à la conclusion qu'une évolution de la perception de l'agriculture et des agriculteurs, comme étant des milieux et des gens qui soutiennent et maintiennent un territoire produisant un si grand nombre de services recherchés par la population, plutôt que des milieux et des gens qui ne produisent que des aliments, a une importance critique pour que le Canada demeure un chef de file de l'agriculture dans le monde. L'agriculture occupe déjà le tiers de la surface terrestre libre de glace (Ramankutty *et al.*, 2008) et les pressions qui s'exercent en vue d'étendre la superficie consacrée à l'agriculture augmentent parallèlement à la demande d'aliments (Foley, 2011). Si nous voulons que les terres cultivées soient maintenues comme des territoires permettant un grand nombre d'utilisations en plus de la production alimentaire, il faut alors prendre en considération les multiples services écosystémiques que peuvent offrir les régions agricoles, et acquérir une meilleure compréhension des interactions entre ces services (Bennett et Balvanera, 2007; Bennett *et al.*, 2009).

## Points saillants du chapitre

### L'agriculture et l'environnement aquatique

- L'activité agricole peut contribuer à la dégradation de l'environnement en réduisant la qualité de l'eau et la quantité d'eau disponible. La nature des effets environnementaux varie largement d'une région agricole à l'autre au Canada, ce qui oblige à tenir compte des conditions locales. L'intensification des activités agricoles, les incertitudes liées au changement climatique et l'évolution de la demande sur le marché sont des facteurs critiques qui influent sur la durabilité des ressources en eau dans les territoires agricoles.
- De profonds changements sont survenus au Canada au niveau des cultures, des méthodes de culture et des pratiques de travail du sol, mais les effets cumulatifs de ces changements sur les systèmes d'eaux de surface et d'eaux souterraines sont mal compris. Les pratiques de culture et de travail du sol visant à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau à l'échelle de la ferme ont donné des résultats prometteurs au pays et ailleurs dans le monde, et représentent un secteur prioritaire de recherche dans le contexte canadien.
- Les pratiques de gestion des terres agricoles, notamment le drainage, peuvent contribuer à accroître l'écoulement des crues, entraînant une diminution du stockage de l'eau sur les fermes et une intensification des effets en aval. Cependant, ces effets peuvent varier considérablement selon les conditions locales. Une meilleure compréhension du risque d'inondation et des possibilités qui s'offrent pour la gestion de ce risque en milieu agricole est un volet clé d'une gestion durable de l'eau.
  - o Il est essentiel de mener des études pilotes à l'échelle des sous-bassins hydrographiques afin de quantifier le risque d'inondation et les effets des pratiques de gestion.
- L'irrigation procure d'importants avantages à l'agriculture, notamment dans les régions où les précipitations sont faibles ou variables. Ces avantages augmenteront vraisemblablement sous l'effet du changement climatique. Cependant, l'irrigation constitue la plus grande forme d'utilisation consommatrice de l'eau au Canada et requiert une compréhension approfondie de la disponibilité des sources d'eau à l'échelle régionale pour assurer une gestion efficace de la ressource. La nature saisonnière du cycle d'irrigation peut réduire les volumes d'eau stockés dans les nappes souterraines et le débit de base des cours d'eau, ce qui représente une menace pour les utilisations en aval, notamment les besoins de l'écosystème, durant les périodes les plus vulnérables.
  - o De meilleures données sur les volumes d'eaux de surface et d'eaux souterraines prélevés par l'irrigation et les effets connexes sur les systèmes d'eaux de surface et d'eaux souterraines seraient essentielles pour la gestion durable de l'eau dans les territoires agricoles.

- Une amélioration du drainage en milieu agricole comporte de précieux avantages parce qu'elle permet d'augmenter la capacité et l'efficacité des terres cultivées au Canada; pourtant, cette pratique est responsable d'une dégradation sérieuse des écosystèmes des terres humides et de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Une compréhension suffisante de ces questions reposant sur des données scientifiques fait défaut, notamment au sujet de la valeur intrinsèque de la qualité de l'eau, de la biodiversité et des terres humides pour le stockage de l'eau.
- Bien que cette question soit abordée ailleurs dans le rapport, le comité d'experts note que les effets potentiels du changement climatique – plus précisément les changements dans la disponibilité temporelle et spatiale de l'eau dans les territoires agricoles au Canada – sont pour l'essentiel inconnus et présentent un défi redoutable sur le plan de la gestion durable des terres et de l'eau pour l'ensemble des utilisations agricoles.

### **Les possibilités d'atténuation par le biais des PGB**

- L'investissement canadien dans la recherche sur les PGB est louable et laisse entrevoir des résultats prometteurs quant à l'adoption de PGB en vue d'une gestion durable de l'eau en milieu agricole. Nous ne disposons pas de résultats quantitatifs et des défis particuliers continuent de se poser :
  - o La sélection de stratégies axées sur les PGB qui représentent les options les plus efficaces dans les diverses régions agricoles du Canada.
  - o La nécessité de produire une évaluation quantifiable du rendement des diverses PGB qui s'offrent pour mieux saisir la portée de leurs effets potentiels pour la préservation de la qualité de l'eau et de la quantité d'eau en milieu agricole.
  - o Un suivi attentif de leur rendement sur le terrain dans différentes régions agricoles.
  - o Une plus grande attention accordée à l'impact des stratégies axées sur les PGB sur la qualité et la quantité des eaux souterraines.
  - o Une évaluation des cadres de gouvernance, des attitudes au sein de la société et des obstacles économiques à l'adoption et à la mise en œuvre efficace de programmes optimaux de PGB partout au Canada.

### **L'agriculture de conservation**

- L'agriculture de conservation vise à accroître la diversité de la production agricole afin d'augmenter la résilience des systèmes agricoles et elle comporte de puissantes synergies avec plusieurs PGB.
- D'autres recherches sont requises afin de quantifier les avantages potentiels de l'agriculture de conservation en ce qui a trait :
  - o à l'atténuation des effets négatifs de l'agriculture sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau;

*suite à la page suivante*



- o au potentiel d'amélioration de la résilience dans un contexte de changement climatique.

### **Vers une approche axée sur les services écosystémiques**

- Au-delà du rôle fondamental que peuvent jouer les pratiques agricoles pour atténuer les effets négatifs de la production agricole, le comité d'experts estime que l'agriculture a un rôle social à jouer en vue de soutenir une gamme étendue de services écosystémiques et d'améliorer la qualité de l'environnement.
- Une évolution de la perception de l'agriculture et des agriculteurs, comme étant des milieux et des gens qui soutiennent et maintiennent les territoires produisant un si grand nombre de services recherchés par la population, et non uniquement des milieux et des gens qui produisent des aliments, revêt une importance critique si l'on veut que le Canada demeure un chef de file de l'agriculture dans le monde. Cependant, pour favoriser une telle évolution, il faudrait entreprendre des recherches supplémentaires dans divers domaines liés aux services écosystémiques et à l'environnement, en particulier des recherches visant à mieux comprendre les effets des décisions de gestion sur les multiples services écosystémiques, y compris le biodiversité et les habitats.

# 5

## **Technologies prometteuses à l'échelle de la ferme : améliorer la productivité de l'eau et atténuer les effets sur l'environnement**

- Technologies d'irrigation
- Le paillage
- La récolte de l'eau de pluie et de la neige soufflée par le vent
- Déchets agricoles et traitement des eaux de drainage
- Utilisation de ressources hydriques dégradées et de biosolides
- Semences génétiquement améliorées, végétaux à caractères nouveaux et autres biotechnologies
- Technologies à l'appui d'une agriculture de précision
- Formulation des engrais et des pesticides
- Régulateurs de la croissance des plantes et osmolytes
- Stabilisateurs de sol
- Nanotechnologies
- Technologies d'élevage

## 5. Technologies prometteuses à l'échelle de la ferme : améliorer la productivité de l'eau et atténuer les effets sur l'environnement

### Aperçu

Un éventail d'options technologiques touchant l'irrigation, l'agriculture de précision, les pesticides à risque réduit et d'autres domaines peuvent contribuer à maximiser les possibilités et à gérer les risques en améliorant la productivité de l'eau, en atténuant les effets sur l'environnement et en favorisant de façon générale la productivité et la résilience de l'agriculture. Des recherches ciblées sont nécessaires afin de mieux comprendre les options technologiques et les priorités de recherche qui conviennent davantage à chaque contexte agricole. Des projets de démonstration et de vulgarisation agricoles sont aussi requis pour intensifier l'adoption et le déploiement réussi des résultats de la recherche et des développements technologiques.

Les développements technologiques ont contribué à hausser de façon spectaculaire la productivité globale des systèmes agricoles, mais il subsiste des interrogations fondamentales sur la probabilité que cette tendance se poursuive dans l'avenir et puisse être soutenue dans le contexte d'une approche plus axée sur la conservation et les services écosystémiques pour la production agricole. Cependant, les spécialistes internationaux affichent un certain optimisme quant aux améliorations futures de la productivité agricole et de la qualité de l'environnement qu'il est possible de réaliser. Si ces développements sont mis en œuvre, l'agriculture devrait pouvoir relever le défi de produire une quantité suffisante d'aliments pour nourrir une population mondiale croissante tout en limitant son impact sur l'environnement, face aux difficultés futures engendrées par les contraintes qui s'exercent sur les ressources hydriques et le changement climatique (Angus *et al.*, 2009; Beddington, 2010; Falkenmark *et al.*, 2007; Godfray *et al.*, 2010; Jaggard *et al.*, 2010). Les technologies agricoles ne sont pas une solution de remplacement ou de rechange aux PGB, mais elles sont un complément qui vient renforcer leur efficacité et leurs résultats (chapitre 4). Par conséquent, il est possible d'envisager pour l'avenir un recours accru aux systèmes technologiques et leur intégration plus étroite aux PGB.

Outre les nouveaux développements technologiques, une progression importante de la production pourrait survenir si l'on parvient à résoudre certains problèmes critiques liés à l'accès à la technologie, à l'expertise et aux ressources dans les pays en développement (Godfray *et al.*, 2010). Dans ces pays, des hausses de rendement

importantes sont anticipées par suite du déploiement réussi des technologies et des connaissances existantes (Godfray *et al.*, 2010). Toutefois, il est largement reconnu que la productivité élevée des pratiques agricoles courantes s'accompagne souvent d'une utilisation sous-optimale des ressources, d'une dégradation de l'environnement et d'une réduction de la biodiversité naturelle (Beddington, 2010; Falkenmark *et al.*, 2007; Godfray *et al.*, 2010). Par conséquent, les possibilités considérables qui s'offrent à l'industrie agricole doivent être conciliées avec le besoin d'augmenter la production alimentaire tout en réduisant les intrants en ressources, en maximisant l'efficacité de leur utilisation, en haussant la productivité des terres et de l'eau et en limitant les effets sur l'environnement et la dégradation du milieu naturel. Cela nécessitera un engagement et des investissements continus à long terme dans les programmes de recherche-développement afin de perfectionner les technologies agricoles et les pratiques de gestion existantes et d'en concevoir de nouvelles. Ne pas assumer cette responsabilité et faire les investissements connexes aura de sérieuses conséquences pour la population mondiale et l'environnement.

En contraste avec l'Europe et l'Amérique du Nord, où les investissements publics dans la recherche agricole sont en déclin, d'autres pays, notamment la Chine et l'Inde, accélèrent la cadence et accroissent leurs investissements dans des programmes de recherche (Piesse et Thirtle, 2010). Les résultats publiés par les chercheurs chinois attirent une attention croissante; il est évident que la Chine accorde beaucoup d'importance au développement de la technologie dans le domaine de la gestion des eaux agricoles, dans le but de conserver une plus grande quantité d'eau et de l'utiliser de façon plus efficace. L'investissement public dans la recherche agricole a été stratégiquement orienté pour permettre de relever les défis futurs liés au changement climatique et aux graves déficits régionaux et saisonniers en eau que connaît la Chine, et d'assurer ainsi la sécurité des approvisionnements en aliments et en eau et l'intégrité écologique du pays (Li, 2006; Pu-te, 2010).

Hsiao *et al.* (2007) utilisent une approche axée sur la chaîne des processus pour déterminer l'impact de changements systématiques dans l'efficacité de l'utilisation de l'eau à chaque étape de l'ensemble du processus agricole. Puisque l'efficacité globale représente l'intégration de l'efficacité de plusieurs étapes du processus (dont l'approvisionnement en eau, l'extraction de l'eau du sol, la transpiration, la photosynthèse et la conversion en biomasse/rendement cultural et en produits animaux), il est plus efficace d'apporter des améliorations limitées aux multiples étapes plutôt que de se concentrer intensivement à améliorer seulement une ou deux étapes. Par conséquent, répartir systématiquement les ressources et les activités de recherche entre une gamme étendue de technologies axées sur l'eau

agricole et de pratiques de gestion interdépendantes produira probablement une amélioration plus importante de l'efficacité économique globale de l'utilisation de l'eau que de se concentrer seulement sur un petit nombre de domaines.

O'Neill et Dobrowolski (2011) ont identifié six grands domaines où la recherche agricole peut avoir un impact sur la gestion de l'eau en vue de garantir la sécurité de l'eau destinée à des fins agricoles qui, selon la définition de l'USDA (2009), « décrit le besoin de maintenir des approvisionnements en eau adéquats pour répondre aux besoins en aliments et en fibres d'une population croissante – maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les agriculteurs, les éleveurs et les collectivités rurales » [traduction]. Cinq domaines ont un fondement critique sur le plan de la technologie et de la gestion : la biotechnologie, la réutilisation de l'eau, la conservation en général, l'efficacité de l'irrigation et l'état de préparation à la sécheresse. Le sixième domaine de recherche est lié aux marchés et au commerce de l'eau. À cette liste de grands domaines, il est possible d'ajouter les sujets prioritaires suivants : les biosolides et la réutilisation des autres biodéchets, la désalinisation, l'agriculture de précision et la conservation, la nanotechnologie, la formulation des engrais et des pesticides, les épandeurs à débit variable, les régulateurs de la croissance des plantes et les osmolytes, ainsi que le bétail. La recherche interdisciplinaire et le développement et l'application de technologies géospatiales, biotechnologiques et axées sur l'agriculture de précision, jumelés à des outils de modélisation appropriés, offrent l'assise pour parvenir à des augmentations durables de la production alimentaire tout en préservant la qualité de l'environnement (Acevedo, 2011).

Pour que les nouvelles méthodes soient appliquées avec succès, une recherche de haute qualité devrait s'accompagner d'une large diffusion des connaissances. Le développement par l'échange de technologies, la formation et la vulgarisation a un rôle critique à jouer pour mettre en pratique de manière efficace les innovations et les nouvelles technologies issues de la recherche (Backeberg et Sanewe, 2006)<sup>31</sup>. Dans les sous-sections qui suivent, plusieurs domaines retenus par le comité d'experts sont examinés parce qu'ils pourraient contribuer à une gestion durable de l'eau dans le secteur agricole canadien, entre autres les technologies d'irrigation, les biotechnologies, les technologies à l'appui de l'agriculture de précision et les nanotechnologies (voir le tableau 5.1).

---

31 Voir aussi l'analyse des stratégies de transfert de connaissances au chapitre 6.

Tableau 5.1

## Survol des possibilités technologiques et des avantages potentiels

Possibilité technologique	Avantages potentiels
Technologies d'irrigation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Améliorent la productivité de l'eau et réduisent le ruissellement provenant des activités agricoles grâce à un meilleur contrôle quantitatif et dans le temps de l'eau dispensée par les systèmes d'irrigation</li> </ul>
Paillage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmente la productivité de l'eau dans les cultures.</li> <li>• Réduit la quantité d'herbicides utilisés</li> </ul>
Récolte de l'eau de pluie et de la neige soufflée par le vent	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infrastructure ou techniques de gestion des terres qui permet la rétention de l'eau de pluie et de la neige afin d'améliorer l'approvisionnement en eau et la productivité agricole</li> </ul>
Traitements des eaux agricoles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protègent la qualité de l'eau et des services écosystémiques en aval</li> <li>• Facilitent la réutilisation de l'eau d'irrigation</li> </ul>
Utilisation de ressources hydriques dégradées et de biosolides	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilités de conserver l'eau et les nutriments dans l'environnement local, ce qui réduit les déchets et l'impact sur l'environnement, améliore la fertilité du sol et la productivité de l'eau, et étend la zone géographique de certains types d'agriculture</li> </ul>
Semences génétiquement améliorées, plantes possédant de nouveaux caractères et autres biotechnologies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration des rendements par unité de superficie et augmentation de la valeur nutritive/énergétique par unité</li> <li>• Amélioration de la tolérance à la sécheresse et à la salinité</li> <li>• Plus grande productivité de l'eau et des nutriments</li> <li>• Extension de la zone géographique où les cultures peuvent être pratiquées et allongement de la saison de croissance</li> <li>• Amélioration de la résistance aux parasites et aux maladies tout en atténuant l'impact sur le sol et l'eau grâce à des pesticides à risque réduit</li> </ul>
Technologies à l'appui de l'agriculture de précision	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technologies de télédétection : meilleure compréhension des profils météorologiques et des besoins des cultures permettant de mieux gérer l'utilisation de l'eau dans le temps</li> <li>• Technologies intelligentes sur le terrain : meilleure compréhension des besoins des cultures (à l'aide de technologies de télédétection et de détection sur le terrain), combinées à une application plus précise de l'eau, des nutriments et des pesticides; plus grande précision et réduction des déchets, ce qui permet d'améliorer la productivité et la qualité de l'eau</li> </ul>
Pesticides à risque réduit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque réduit pour l'environnement, les utilisateurs et le public</li> </ul>
Régulateurs de la croissance des plantes/bioestimulants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plantes pouvant supporter des stress abiotiques, permettant de récupérer les pertes de rendement qui pourraient autrement se produire</li> </ul>

suite à la page suivante

Possibilité technologique	Avantages potentiels
Stabilisateurs synthétiques des sols	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilisent la surface du sol et les propriétés floculantes, et améliorent la qualité des eaux de ruissellement en réduisant la quantité de sédiments, d'azote et de phosphore réactif dissous et total, la demande chimique en oxygène, les pesticides, les graines de mauvaises herbes et les microorganismes dans les eaux de ruissellement des sols non irrigués et irrigués</li> <li>• Permettent de contrôler l'érosion des sols et d'accroître l'infiltration d'eau</li> </ul>
Nanotechnologies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nanopesticides dont la libération peut être échelonnée dans le temps ou liée à un déclencheur; systèmes de libération « intelligents »</li> <li>• Nanoengrais qui permettent de réduire la perte d'azote attribuable à la lixiviation; libération sélective chronorégulée ou liée aux conditions du milieu; produits à libération progressive</li> <li>• Nanocapteurs pouvant détecter la présence de contaminants, de pathogènes, de nutriments et d'un stress abiotique chez les plantes; utilisation et application plus précise des intrants dans le temps</li> <li>• Amélioration de la rétention de l'eau dans les sols sablonneux et accroissement de la porosité des sols argileux</li> <li>• Nanotechniques de traitement de l'eau pour en retirer les impuretés et, éventuellement, d'autres particules/micro-organismes présents dans l'eau</li> </ul>
Technologies d'élevage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Progrès dans les pratiques d'alimentation et de reproduction permettant d'améliorer la productivité, de renforcer la résistance aux maladies (de façon à limiter l'emploi de médicaments et d'antibiotiques) et d'atténuer l'impact sur l'environnement (p. ex. la production de méthane)</li> </ul>

À noter que ce tableau vise à présenter des exemples et n'est pas exhaustif.

## 5.1 TECHNOLOGIES D'IRRIGATION

L'irrigation est essentielle à la production culturale dans les régions arides mais aussi, dans les autres régions, en tant que source complémentaire des chutes de pluie naturelles qui permet d'éliminer l'incertitude liée aux précipitations sporadiques et insuffisantes (Brouwer et Heibloem, 1986), comme c'est le cas au Canada. L'agriculture irriguée occupe jusqu'à 29 % de la superficie cultivée dans le monde (de Fraiture et Wichelns, 2010). Faurès *et al.* (2007) affirment que l'irrigation demeurera essentielle dans l'avenir pour fournir des aliments abordables et de haute qualité, et ils estiment que sa part de la production alimentaire mondiale passera à plus de 45 % d'ici 2030, contre environ 40 % à l'heure actuelle.

Les technologies d'irrigation se sont développées de façon significative durant les 50 dernières années et nous avons accès à beaucoup de renseignements et de conseils sur leur conception et leur fonctionnement<sup>32</sup>. Les entreprises multinationales présentes dans le secteur de la production agricole peuvent aussi fournir des renseignements et des conseils sur la bonne gestion de l'eau, y compris le fonctionnement des systèmes d'irrigation (Unilever, 2010). Les conseils sur la qualité et la durabilité de l'eau à des fins d'irrigation agricole (Ayers et Wescot, 1985) et la réutilisation des eaux usées (Pescod, 1992) abondent également. Ainsi, les méthodes d'irrigation constituent des technologies bien établies en agriculture; cependant, on peut affirmer qu'une bonne partie de la documentation sur ces technologies n'a pas été révisée ou mise à jour depuis plus de 20 ans, et il y a donc un urgent besoin d'y intégrer les plus récents développements technologiques.

Les technologies matérielles et les méthodes d'irrigation peuvent être réparties entre les méthodes d'irrigation de surface, les systèmes d'arrosage par aspersion et les techniques d'irrigation goutte-à-goutte (Brouwer *et al.*, 1988). Au Canada, la majorité des fermes irriguées utilisent des techniques d'arrosage par aspersion pour tous les types de cultures, bien que les méthodes d'irrigation goutte-à-goutte soient fréquemment employées dans les cultures fruitières (Poirier, 2009). Les avantages de l'irrigation goutte-à-goutte pour contrôler avec précision l'utilisation de l'eau sont largement reconnus dans la production des fruits et des légumes, mais on observe un intérêt croissant pour cette forme d'irrigation dans les cultures en champs, y compris la luzerne, le maïs, le coton, les oignons, les pommes de terre et les tomates de transformation (Bisconer, 2010; Knox *et al.*, 2007). Parmi ces avantages, il y a une hausse des rendements, de la qualité et de l'uniformité, outre une baisse des coûts en eau, en engrais, en énergie, en main-d'œuvre et en produits chimiques, ainsi qu'une réduction significative des problèmes liés aux maladies étant donné que les plants ne sont pas mouillés.

Des solutions technologiques sont également disponibles pour atténuer les problèmes liés au drainage de l'eau d'irrigation qui touchent la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, par exemple les services de drainage ou de désalinisation de l'eau de drainage avant son déversement, ce qui contribue à la durabilité de l'irrigation (Wichelns et Oster, 2006). Dans de tels cas, les coûts d'application de la technologie pour en venir à une irrigation durable peuvent toutefois être importants sinon prohibitifs (Pardossi et Incrocci, 2011; Wichelns et Oster, 2006).

---

32 Parmi ces ressources, il y a notamment les manuels *Irrigation Water Management*, publiés par la FAO (Brouwer *et al.*, 1985; Brouwer et Heibloom, 1986; Brouwer *et al.*, 1989; Brouwer *et al.*, 1988; Walker, 1989).



L'efficacité de l'irrigation se situe habituellement entre 30 et 50 %; un tel niveau d'efficacité équivaut à des pertes importantes parce que l'amélioration des pratiques peut permettre d'atteindre une efficacité variant de 80 à 90 % (Hillel et Vlek, 2005). Les estimations de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans le district d'irrigation de l'Est de l'Alberta tournent habituellement autour de 75 %, une valeur qui est probablement représentative de l'agriculture irriguée dans l'Ouest canadien (CNCID, 1999). Globalement, Hamdy *et al.* (2003) affirment que, dans les modèles d'irrigation « classiques » habituellement employés, seulement 45 % de l'eau appliquée pourra être absorbée par les plantes, ce qui représente des pertes allant jusqu'à 50 % ou plus. Selon les calculs des auteurs, « en supposant une situation représentative où 80 % de toute l'eau utilisée va à l'agriculture, une hausse de 10 % de l'efficacité de l'irrigation permettrait d'augmenter de 50 % ou plus l'eau disponible à des fins municipales et industrielles » [traduction]. Il est clair que les économies potentielles d'eau en agriculture sont importantes (Hsiao *et al.*, 2007), et cela constitue une bonne raison d'élaborer des politiques pour encourager de telles économies; une contribution significative à cet égard pourrait provenir du développement et de l'application de technologies plus efficaces pour la gestion de l'eau (Hamdy *et al.*, 2003). À titre d'exemple, l'Alberta Irrigation Projects Association (AIPA) a constaté que des améliorations dans la gestion des exploitations agricoles et des systèmes d'irrigation plus efficaces dans le bassin de la rivière Saskatchewan Sud étaient à l'origine d'une hausse de 60 à 71 % de l'efficacité de l'irrigation sur les fermes entre 1990 et 1999. Les modèles de simulation utilisés par l'AIPA ont aussi révélé que, dans l'ensemble, l'efficacité de l'irrigation pourrait être encore accrue par des améliorations continues aux infrastructures, aux systèmes installés sur les fermes et à la gestion de l'eau (Irrigation Management Study Committee, 2002).

Les technologies matérielles employées pour l'irrigation se sont aussi améliorées (Hamdy *et al.*, 2003). Mais en dépit de ces améliorations et de l'application d'autres méthodes visant à économiser l'eau, les producteurs agricoles devront continuer à réduire leur consommation d'eau et à améliorer ou à protéger la qualité de l'eau qui s'écoule des opérations agricoles (O'Neill et Dobrowolski, 2011). Il reste encore largement place à une amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau en réduisant le gaspillage entre le point de prélèvement de l'eau, le point de déversement dans le champ et le niveau de la rhizosphère des plantes (Hillel et Vlek, 2005). Le transport de l'eau dans des conduites fermées plutôt que dans des fossés non recouverts pourrait hausser considérablement l'efficacité, pour ne donner que cet exemple.

Dans l'avenir, il y aura d'autres développements technologiques importants dans le contrôle et la gestion des systèmes d'irrigation (Faurès *et al.*, 2007), à la faveur des progrès réalisés dans les technologies informatisées d'automatisation, de surveillance et de programmation en vue d'accroître la précision des apports d'eau par irrigation dans des systèmes répondant en temps réel aux besoins en eau des cultures. Ces technologies feront appel à des techniques de télédétection (p. ex. la surveillance par infrarouge de la température du couvert végétal pour repérer la présence d'un stress hydrique chez les plantes, la mesure du niveau d'humidité dans le sol par détection de la réflectivité à l'aide du système de géopositionnement par satellite), ainsi que la surveillance directe et continue de l'humidité dans la rhizosphère, les réseaux de capteurs sans fil et les modèles avancés adaptables de la demande en eau des cultures afin de pouvoir cartographier les applications en fonction des variations spatiales des conditions des champs et des plantes (Dursun et Ozden, 2011; Pardossi et Incrocci, 2011; Privette *et al.*, 2011; Vijayakumar et Rosario, 2011). L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau permettra aussi de limiter les effets en aval des déversements d'eaux de drainage sur l'environnement aquatique en réduisant le volume et la salinité des effluents. L'agriculture irriguée de demain devra accroître sa production en utilisant moins d'eau (Oster, 1997). Cependant, la possibilité d'atténuer les problèmes inhérents à l'agriculture irriguée par une meilleure gestion et des améliorations technologiques suscite généralement un certain optimisme (van Schilfgaarde, 1994; Wichelns et Oster, 2006). Le développement et l'application de technologies permettant de hausser la productivité de l'eau d'irrigation seront non seulement essentiels pour maintenir et accroître la productivité de l'agriculture dans l'avenir, mais aussi pour permettre de répondre aux demandes croissantes de réaffectation de l'eau vers les secteurs municipal et industriel et aux besoins de l'écosystème (Hamdy *et al.*, 2003).

## 5.2 LE PAILLAGE

L'utilisation de paillis synthétique pour augmenter la productivité des récoltes en manipulant le milieu de culture et/ou le sol est une pratique bien établie dans les pépinières horticolas, les cultures fruitières et la production intensive de légumes en champ (voir, par exemple, Antill, 1990; Sanders, 2001; Sanders *et al.*, 1995; Wittwer, 1993), et les paillis de plastique sont de plus en plus utilisés en agriculture au Canada (Canada-Saskatchewan Irrigation Diversification Centre, 2007; Medina *et al.*, 2009). Les paillis étendus sur la surface du sol comprennent les pellicules de plastique de couleur (habituellement noires ou blanches) ou transparentes, à travers lesquelles les plantes peuvent croître et se développer. Les pellicules transparentes perforées ou les membranes tissées sont également employées pour couvrir en entier une culture sous forme de paillis flottant

(Antill, 1990). On s'intéresse aussi de plus en plus aux techniques de biopaillage fluide qui offrent des avantages similaires aux paillis de sol en pellicule de plastique, mais dont le coût est moins élevé; comme ils sont biodégradables, ils réduisent l'impact associé à l'élimination des déchets de pellicules de plastique après leur utilisation (Chiellini *et al.*, 2008; Immirzi *et al.*, 2008; Immirzi *et al.*, 2009; Malinconico *et al.*, 2006; Schettini *et al.*, 2008). Un inconvénient des paillis de pellicule de plastique est qu'ils peuvent aggraver l'érosion du sol aux endroits non recouverts entre les bandes de plastique (Sanders, 2001).

Les principaux avantages agronomiques du paillage sont notamment une augmentation des rendements et de la qualité des cultures, l'allongement de la saison de culture grâce à des récoltes plus hâtives et la réduction de la demande en eau d'irrigation. Ces avantages sont rendus possibles par la hausse de température des cultures ou du sol, la séparation entre les parties récoltables des plantes et le sol, l'amélioration de la conservation et de la disponibilité de l'eau grâce à une diminution de l'évaporation à la surface du sol et à une meilleure assimilation des nutriments en raison de la réduction des pertes par lixiviation (Kumar et Lal, 2012; Sanders, 2001; Sanders *et al.*, 1995). Même si les taux de transpiration des cultures légumières peuvent augmenter en moyenne de 10 à 30 % avec le paillage, les besoins en irrigation sur l'ensemble de la saison de croissance peuvent diminuer de 10 à 30 % en raison de la baisse (50 à 80 %) de l'évaporation au sol (Allen *et al.*, 1998). Shangyou *et al.* (1997) ont décrit une stratégie globale de développement durable de l'agriculture non irriguée dans le Nord-Ouest de la Chine et montré que les rendements du maïs pouvaient être améliorés de 8 à 10 % par l'adoption de techniques précises de paillage utilisant des pellicules de plastique grâce à une amélioration de la gestion de la conservation de l'eau. Des recherches plus récentes en Chine ont fait ressortir une augmentation des rendements et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) et des économies au niveau de l'eau d'irrigation pour d'autres grandes cultures, dont le blé et les pommes de terre, dans des zones irriguées et non irriguées, suite à l'épandage d'un paillis à la surface du sol (Li *et al.*, 2004; Meng et Wu, 2010; Wang *et al.*, 2009; Xie *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2011). Un autre avantage de l'épandage de paillis à la surface du sol est l'élimination de la croissance et de la concurrence des mauvaises herbes, ce qui réduit les besoins en herbicides (Kumar et Lal, 2012; Sanders, 2001; Sanders *et al.*, 1995).

### 5.3 LA RÉCOLTE DE L'EAU DE PLUIE ET DE LA NEIGE SOUFLÉE PAR LE VENT

Devant l'incertitude croissante au sujet des profils de pluie dans les régions agricoles qui dépendent des précipitations, une stratégie clé pour réduire au minimum le risque de rupture dans l'approvisionnement en eau et éviter la perte de récoltes provoquée par des périodes de sécheresse est de mettre en place une infrastructure de récolte de l'eau (Rockström *et al.*, 2010; Srivastava, 2001). Entre autres exemples, il y a diverses caractéristiques du paysage (p. ex. les crêtes de contour, les étangs) ou les dispositifs de collecte de l'eau (p. ex. les citernes, les réservoirs et les barrages) (Critchley et Siegert, 1991; Khoury-Nolde, s.d.). La récolte de l'eau peut servir à réduire les pertes d'eau par ruissellement et ainsi augmenter l'alimentation en eau des systèmes des bassins hydrographiques (Sekar et Randhir, 2007; Zwart *et al.*, 2010). Certaines régions vulnérables à des périodes de sécheresse, comme en Australie, ont acquis beaucoup d'expérience dans les techniques de récupération de l'eau (Richardson *et al.*, 2004). À l'échelle mondiale, l'adoption généralisée de pratiques de collecte de l'eau sur les exploitations agricoles pourrait :

- contribuer de manière significative à augmenter la productivité des récoltes et
- atténuer les effets négatifs du changement climatique sur la production agricole (Rost *et al.*, 2009). L'application de pratiques de collecte de l'eau a récemment été encouragée au Canada (Exall *et al.*, 2006), mais davantage pourrait être fait pour promouvoir l'adoption de ces techniques en vue d'accroître la disponibilité des ressources hydriques pour la production agricole au pays.

Les techniques de récupération de la neige offrent aussi des possibilités pour augmenter les réserves en eau dans le sol, remplir les étangs (mares-réservoirs) et améliorer le rendement des récoltes dans les conditions de culture qui prévalent au Canada (Pomeroy et Gray, 1995). Dans la région des Prairies, les précipitations annuelles se situent en moyenne entre 300 et 380 mm et environ 30 % de ces précipitations tombent sous forme de neige. Bien que la relation entre la productivité des récoltes et l'apport d'eau dans des champs non irrigués soit très variable, le rendement du blé de printemps, par exemple, peut augmenter jusqu'à 406 kg/ha par 25 mm d'eau ajoutée en sus des niveaux de base habituels. La principale technique pour maximiser la récupération de la neige est d'accroître la rugosité de la surface des terres pour y emprisonner la neige soufflée par le vent; les trois principales méthodes employées à cette fin sont : a) les brise-vent constitués de plantes ligneuses de grande taille (caragan, frêne, érable ou autres arbres) ou de plantes non ligneuses (sorgho du Soudan, agropyre de grande taille, lisières de céréales non coupées) dans les zones cultivées, b) les pratiques de gestion des chaumes (chaume long, chaume de hauteur variable et bandes-pièges) et c) les crêtes de neige. Les expériences faites pour évaluer l'efficacité

de ces techniques ont montré que les crêtes de neige sont souvent peu efficaces en raison des périodes de fonte de mi-saison et de la faible capacité de captage de la neige des crêtes (Steppuhn, 1981), tandis que les brise-vent peuvent être efficaces dans certains cas (Kort *et al.*, 2012) et que la gestion des chaumes est la méthode la plus fiable pour obtenir un couvert neigeux relativement profond et uniforme dans un champ (Pomeroy et Gray, 1995).

## 5.4 DÉCHETS AGRICOLES ET TRAITEMENT DES EAUX DE DRAINAGE

### Zones humides artificielles

Les zones humides artificielles sont des systèmes passifs peu coûteux de traitement des eaux usées qui conviennent particulièrement aux applications agricoles et qui sont de plus en plus utilisés comme solution de rechange pratique aux options de traitement reposant sur des techniques plus avancées (Speer et Champagne, 2006; Wood *et al.*, 2008). Une zone humide artificielle est un bassin ou un étang de stockage de l'eau construit artificiellement qui supporte une végétation aquatique et offre une capacité de biofiltration (Ellis *et al.*, 2003). Ces zones humides possèdent trois caractéristiques fondamentales :

1. Une aire qui soutient (du moins périodiquement) une végétation hydrophyte (c.-à-d. des plantes qui poussent dans l'eau) – en Amérique du Nord, la plante la plus commune dans les zones humides artificielles est le *Typha* (massette), tandis qu'en Europe c'est le *Phragmites* (roseau commun) (Peterson, 1998).
2. Des substrats qui sont principalement des sols hydriques non drainés (continuellement détremés).
3. Des substrats pédologiques (pierre/gravier) qui sont soit saturés d'eau, soit recouverts par intermittence ou de façon saisonnière d'une couche d'eau peu profonde.

(Tiner, 1997)

Étant donné que les zones humides artificielles dépendent de mécanismes passifs et naturels de purification (principalement la sorption physico-chimique et la bioatténuation), leur efficacité opérationnelle est influencée par de nombreux facteurs environnementaux, notamment la température et les précipitations (Speer et Champagne, 2006). L'environnement canadien pose des défis particuliers, notamment une courte saison de croissance des plantes (Speer et Champagne, 2006) et des températures froides en hiver (Kennedy et Mayer, 2002). Néanmoins, nous avons accumulé beaucoup de données expérimentales et d'expérience dans la conception et l'exploitation de zones humides artificielles pour le traitement de divers types d'eaux usées agricoles au Canada (voir Gottschall *et al.*, 2007;

Hayman et Maaskant, 1994; Kennedy et Mayer, 2002; Madani *et al.*, 2010; Peterson, 1998; Smith *et al.*, 2005; Speer et Champagne, 2006; Trias *et al.*, 2004; Wood *et al.*, 2008).

La recherche a démontré l'efficacité des zones humides artificielles à retirer des solides en suspension et à réduire la demande biologique en oxygène (DBO) (Smith *et al.*, 2006; Trias *et al.*, 2004), de l'azote et du phosphore (Dunne *et al.*, 2005; Gottschall *et al.*, 2007; Phipps et Crumpton, 1994; Smith *et al.*, 2006; Trias *et al.*, 2004; Vymazal et Kröpfelová, 2010; Wood *et al.*, 2008), des pesticides (Gregoire *et al.*, 2009) et des agents pathogènes (Díaz *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2005) des différentes eaux usées agricoles, dont les eaux de ruissellement des élevages de porcs et des fermes laitières, les eaux de lessivage des laiteries, les effluents d'ensilage et du fumier stocké sur la ferme, le fumier liquide et les eaux de drainage agricoles en sous-surface (Dunne *et al.*, 2005; Gottschall *et al.*, 2007; Madani *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2006; Trias *et al.*, 2004; Wood *et al.*, 2008).

Le taux de charge hydrologique et le temps de rétention hydraulique sont les deux paramètres opérationnels importants qui influent sur le taux de retrait des contaminants dans les systèmes de zones humides artificielles employés pour le traitement des eaux usées agricoles. Ainsi, des charges hydrologiques élevées réduisent l'efficacité du retrait du phosphore (Smith *et al.*, 2006; Wood *et al.*, 2008), et l'efficacité de la rétention du phosphore diminue en hiver lorsque les apports hydrologiques augmentent à cause des chutes de pluie et de la fonte des neiges (Dunne *et al.*, 2005; Wood *et al.*, 2008). Il faut aussi gérer attentivement la charge hydraulique pour le traitement de la pollution non ponctuelle par les pesticides (Gregoire *et al.*, 2009). Les flux de pesticides peuvent être réduits de 50 à 80 % lorsque les voies hydrauliques dans les zones humides artificielles sont optimisées en haussant la rétention hydraulique par un facteur de 10, en procédant à la recirculation ou en réduisant les débits. En fait, les mécanismes de biorestauration qui opèrent dans les zones humides artificielles peuvent pratiquement éliminer les résidus de pesticides provenant de sources non ponctuelles pourvu que le temps de rétention et de contact soit suffisant (Gregoire *et al.*, 2009).

Par contre, les systèmes de taille réduite qui comportent des temps de rétention relativement courts sont efficaces pour le traitement des eaux usées agricoles lorsque leur principale fonction est de réduire la contamination microbiologique. À titre d'exemple, Díaz *et al.* (2010) ont montré que des zones humides artificielles de taille relativement restreinte, comportant des périodes de rétention brèves (moins d'un jour), parvenaient à réduire efficacement la contamination bactérienne (70 %) des écoulements de restitution de l'irrigation dans de grandes exploitations agricoles (avec un ratio allant jusqu'à 360:1) dans des conditions climatiques

chaudes comme on en trouve en Californie. Smith *et al.* (2005) ont aussi fait état de l'efficacité de l'élimination de bactéries indicatrices (> 98 %) dans des systèmes de traitement utilisant des zones humides artificielles de petite taille pour recevoir les eaux usées de fermes laitières (un mélange de fumier et d'eaux de lessive de laiterie) dans les conditions qui prévalent au Canada; cette technique s'est révélée également efficace durant les périodes chaudes et les périodes froides, comme on en observe en Nouvelle-Écosse. Dans ce cas, la période de rétention était plus longue, équivalant à 95 jours, mais après une forte pluie ou une fonte de neige, le temps de rétention diminuait à entre 15 et 18 jours.

Dans l'ensemble, Smith *et al.* (2006) affirment que les zones humides artificielles sont ressorties comme étant une méthode de traitement prometteuse pour l'élimination des nutriments dans les eaux usées de laiterie durant toute l'année au Canada atlantique. Cependant, des incertitudes subsistent au sujet des mécanismes responsables du retrait de l'azote dans les zones humides artificielles. On pense que la dénitrification est le principal mécanisme de retrait de l'azote des eaux usées dans les zones humides artificielles, mais les mesures disponibles sont insuffisantes pour confirmer cette hypothèse (Vymazal et Kröpfelová, 2010). Les zones humides artificielles constituent un puits d'azote; cependant la rétention de l'azote peut dépendre du débit de charge. Ainsi, Phipps et Crumpton (1994) ont souligné que les zones humides artificielles pouvaient agir comme des puits d'azote durant les périodes de forte charge en nitrates, mais deviennent des sources d'azote durant les périodes de faible charge en nitrates. En outre, les systèmes à débit élevé étaient exportateurs nets d'azote organique sur un cycle annuel. Par conséquent, une surveillance et des recherches fondamentales plus poussées sont nécessaires pour optimiser ces procédés, et notamment pour quantifier les mécanismes de transformation, les sources et les puits d'azote.

Les zones humides artificielles constituent une approche efficace pour le traitement des eaux usées agricoles en vue de leur déversement dans l'environnement afin de protéger la qualité des eaux de surface et les services écosystémiques. Cependant, ils pourraient aussi offrir une solution aux problèmes de disponibilité des ressources hydriques à des fins d'irrigation. Ainsi, Madani *et al.* (2010) ont décrit la conception, la construction et le fonctionnement d'un système de zones humides artificielles pour le traitement des eaux de drainage agricoles en sous-surface, jumelé à un réservoir de stockage pour l'irrigation, et démontré que cette approche améliorerait la qualité de l'eau et pouvait plus que satisfaire les besoins en eau de la zone irriguée. Cependant, l'eau stockée ne respectait pas toujours les normes microbiologiques établies comme lignes directrices pour l'eau d'irrigation. Étant donné que les zones humides artificielles éliminent efficacement la bactérie indicatrice des coliformes fécaux, il est probable qu'une contamination secondaire

attribuable à des apports d'animaux et d'oiseaux sauvages pourrait fournir une explication possible pour la qualité microbiologique variable des eaux traitées durant leur stockage.

Un autre avantage des zones humides artificielles est qu'elles peuvent offrir un habitat pour la faune. Néanmoins, les zones humides artificielles sont conçues expressément pour retenir des polluants et les contaminants présents dans les eaux usées (p. ex. des substances potentiellement toxiques, des pesticides, des produits médicaux vétérinaires) pourraient s'accumuler et avoir des effets nocifs sur la faune (Kennedy et Mayer, 2002). Il est plus probable que ce problème se pose pour les eaux usées municipales et industrielles que pour les eaux usées agricoles. Cependant, il importe d'évaluer ce qu'il advient des contaminants potentiels présents dans les eaux usées agricoles traitées dans des zones humides artificielles – et ce que cela suppose pour la faune et l'environnement – (Kennedy et Mayer, 2002). Le scénario d'une restauration des zones humides naturelles dans les prairies a été examiné par Pomeroy *et al.* (2010) dans une étude de modélisation qui a laissé entrevoir la possibilité d'une réduction substantielle du rendement en eau et de la superficie contributrice d'un bassin de fondrière des prairies, ce qui pourrait aussi avoir une incidence sur la qualité de l'eau.

### **Barrières perméables et filtres et systèmes de dénitrification *in situ***

Parmi les autres solutions à l'élimination de l'azote et du phosphore des eaux usées agricoles, il y a les barrières d'interception perméables et les systèmes avancés de filtration qui favorisent une bioatténuation ou une rétention des contaminants provenant des nutriments.

L'azote est atténué par une combinaison de processus d'oxydation et de réduction biologiquement assistée dans les différentes couches de la barrière ou du filtre, selon que le contenu en azote minéral dans les eaux usées est sous forme oxydée ou réduite. L'azote ammoniacal est initialement oxydé par des bactéries aérobiques nitrifiantes et l'azote nitrifié est ensuite éliminé durant la phase anaérobique des processus de dénitrification biologique. Des copeaux de bois sont utilisés comme supports microbiens pour l'élimination de l'azote et servent aussi de source de carbone organique pour la biodénitrification hétérotopique dans des conditions anaérobiques (Ergas *et al.*, 2010; Robertson *et al.*, 2007; Ruane *et al.*, 2012). L'immobilisation par la biomasse microbienne semble être un important mécanisme de bioatténuation de l'azote dans les systèmes de filtration aérobique (Ruane *et al.*, 2012). Les copeaux de bois constituent aussi un médium de filtration efficace pour l'élimination des solides en suspension et de la demande chimique en oxygène (DCO) des eaux usées agricoles (Ergas *et al.*, 2010; Ruane *et al.*, 2012).



Contrairement à l'azote, la sorption chimique est le principal mécanisme d'élimination du phosphore des eaux usées et elle est réalisée en construisant des barrières avec des matériaux ayant de fortes propriétés de liage et de rétention du phosphore. Les minéraux et les boues à base de fer et d'aluminium ont démontré un potentiel considérable pour lier le phosphore et sont habituellement employés à cette fin. Cela donne aussi la possibilité de réutiliser des ressources secondaires avec des concentrations élevées en fer et en aluminium, par exemple la boue d'ocre provenant du traitement des eaux de mines (Heal *et al.*, 2004) ou des sous-produits d'eau non contaminée provenant du traitement de l'eau potable (Babatunde et Zhao, 2007; Ippolito *et al.*, 2011; Miller *et al.*, 2011; Stoner *et al.*, 2012; Zhao et Yang, 2010).

L'injection directe d'une source simple de carbone soluble (p. ex. un acétate) dans le milieu situé sous la surface est une autre méthode d'élimination de l'azote, en stimulant le processus de dénitrification biologique naturelle *in situ* dans les systèmes d'eaux souterraines (Cartmell *et al.*, 2000; Smith *et al.*, 1999; Tompkins *et al.*, 2001). Cette technique offre une solution potentiellement viable pour le traitement *in situ* des eaux souterraines à concentration élevée en nitrates dans le voisinage des puits d'eau potable municipaux à grande capacité (Gierczak *et al.*, 2007).

### Systèmes de bioremédiation des pesticides sur la ferme

Le rejet de résidus de pesticides à faible concentration provenant des restes de mélanges de pesticides, des eaux de lavage du matériel d'épandage ou des eaux contaminées provenant d'autres opérations générales de nettoyage représente une importante source ponctuelle de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines par les pesticides utilisés en agriculture (de Wilde *et al.*, 2007). Cependant, les techniques de bioremédiation sur la ferme offrent une solution efficace pour le traitement des eaux usées contaminées par des sources ponctuelles de pesticides. Habituellement, ces techniques emploient des bioréacteurs avancés renfermant un composé pédologique ou un autre substrat organique solide (p. ex. du compost, de la paille ou de la tourbe). Quatre systèmes ont fait l'objet de descriptions et de rapports détaillés : 1) le bioréacteur à base de terre, 2) le biolite, 3) le Phytobac et 4) le biofiltre (de Wilde *et al.*, 2007; Hart *et al.*, 2012; Yoder *et al.*, 2001). Selon les rapports, le taux d'efficacité de ces traitements dépasse généralement 95 % et peut même dépasser 99 % pour ce qui est du retrait des contaminants (de Wilde *et al.*, 2007; Yoder *et al.*, 2001).

La construction des biolites est la plus simple, consistant en une fosse excavée revêtue d'argile qui est ensuite remplie d'une matrice bioréactive. Le système Phytobac est similaire au biolite, sauf qu'il comprend un revêtement technique

en béton ou une géomembrane qui empêche le mouvement de l'eau vers le bas. Les biofiltres représentent le système le plus sophistiqué; ils consistent en plusieurs bassins de confinement reliés en série (habituellement trois, chacun ayant un volume de 1 m<sup>3</sup>) qui contiennent la matrice bioréactive. Les biofiltres ont l'avantage de pouvoir traiter de grands volumes d'effluents et ils offrent une plus grande souplesse dans la conception du système. La performance des biolits pour le traitement des déchets renfermant des pesticides sur la ferme a récemment été évaluée au Canada (Wolf, 2012).

Au terme d'un examen critique des systèmes de bioremédiation pour le traitement des pesticides sur la ferme, de Wilde *et al.* (2007) ont fait observer que certains pesticides, notamment les fongicides, peuvent s'accumuler dans les systèmes de traitement de type biolit, et ils ont donc recommandé que d'autres recherches soient menées afin de déterminer : a) quels sont les pesticides ou les groupes de pesticides qui pourraient éventuellement s'accumuler, b) le risque que les pesticides deviennent mobiles au cours du cycle de vie du biolit et c) la période de dégradation des pesticides dans les déchets du biomélange après le démantèlement du biolit. D'autres recherches sont nécessaires sur l'utilisation de méthodes de bioaugmentation microbienne pour accélérer le taux de dégradation des pesticides.

L'épandage des eaux usées contenant des pesticides sur les terres est également une approche couramment employée pour éliminer les produits chimiques entrant dans les bains parasitocides, tels que le diazinon, l'un des principaux pesticides organophosphatés employés dans les bains parasitocides au Royaume-Uni (DEFRA, 2001; Environment Agency, 2003). Cependant, cette pratique n'est acceptable que si l'on applique rigoureusement les lignes directrices et les mesures de contrôle environnemental destinées à protéger les ressources hydriques (DEFRA, 2001). À titre d'exemple, l'épandage n'est pas permis si le terrain est gelé ou saturé d'eau, si le sol est fissuré en raison d'un climat sec ou s'il a récemment été drainé (DEFRA, 2001). À la suite d'une évaluation fondée sur de multiples critères de diverses options pour l'élimination des pesticides, Al Hattab et Ghaly (2012) ont montré que, dans l'ensemble, l'épandage sur les terres constitue la méthode la plus pratique, efficace et économique pour éliminer les eaux usées contenant des pesticides. Cependant, comme il était à prévoir, cela ne garantit pas le confinement des pesticides et il est donc essentiel d'employer des méthodes appropriées de gestion de l'épandage.

### Filtration lente sur sable

La filtration lente sur sable (FLS) est l'un des premiers procédés de traitement de l'eau potable à avoir été utilisé (Iwasaki, 1937) et constitue toujours une importante méthode de traitement à phase unitaire pour améliorer la qualité

physique, biologique et chimique de l'eau. Le taux élevé d'efficacité du traitement de l'eau par filtration lente sur sable s'explique en partie par le faible débit de filtration (0,1 à 0,3 m/h) et la finesse des granules de sable (0,1 à 0,3 mm), mais il est aussi attribuable aux procédés biologiques se déroulant dans la couche de limon qui s'accumule à la surface du sable (*schmutzdecke*) et dans les couches supérieures du lit de sable (Campos *et al.*, 2002; Huisman et Wood, 1974). Ainsi, une combinaison de procédés physico-chimiques et biologiques est responsable de la purification de l'eau et se traduit par des niveaux élevés d'élimination des microorganismes pathogéniques entériques de l'eau potable traitée par FLS (Campos *et al.*, 2002). Ces caractéristiques signifient aussi que la méthode de FLS figure parmi les procédés les mieux adaptés et les plus efficaces pour le traitement et la réduction du risque d'accumulation d'agents pathogènes végétaux dans les eaux d'irrigation recyclées dans les systèmes de production horticole intensive protégée (Calvo-Bado *et al.*, 2003; Hunter *et al.*, 2012; Pettitt et Hutchinson, 2005). Par conséquent, la FLS permet le recyclage et la réutilisation des eaux d'irrigation utilisées et des solutions de nutriments, ce qui diminue à la fois les déversements d'eaux usées et la lixiviation ou l'écoulement des nutriments dans les systèmes d'eaux de surface et d'eaux souterraines.

## 5.5 UTILISATION DE RESSOURCES HYDRIQUES DÉGRADÉES ET DE BIOSOLIDES

L'utilisation d'eaux usées recyclées et de biosolides sur les terres agricoles permet de boucler les cycles locaux de l'eau et des nutriments à un coût minime et avec le minimum d'intrants en énergie, ce qui favorise le développement durable (Langergraber et Muelleger, 2005). Dans certaines régions où l'eau est rare, il ne pourrait y avoir de production agricole sans irrigation utilisant les eaux usées municipales (Qadir *et al.*, 2007). Au Canada, la réutilisation de l'eau est actuellement sous-développée comme ressource, même si l'on a acquis une expérience considérable dans la pratique de l'agriculture et d'autres utilisations des terres (Exall *et al.*, 2006). Cependant, les pressions suscitées par le changement climatique et d'autres facteurs ayant une incidence sur les ressources hydriques devraient contribuer à stimuler l'expansion de la récupération et la réutilisation des eaux usées au Canada (Exall *et al.*, 2006). L'utilisation de biosolides en agriculture est aussi largement répandue à l'étranger (voir le tableau 5.2). Habituellement, de 30 à 40 % de la production totale de boues des usines de traitement des eaux usées des centres urbains est recyclée vers les terres agricoles. Cela est vrai même au Canada, bien qu'il y ait une variation importante entre les provinces dans la proportion et la quantité de biosolides recyclés sur les terres (LeBlanc *et al.*, 2008).

Tant les eaux usées que les biosolides sont considérés comme des sources potentielles d'agents pathogènes infectieux et de contaminants chimiques, et doivent donc être utilisés de manière responsable. Leur utilisation en agriculture donne lieu à beaucoup de recherches et est habituellement encadrée par une réglementation et/ou des directives accompagnées de conseils et de codes de bonnes pratiques agricoles détaillés, ainsi qu'une évaluation du risque visant clairement à protéger la santé humaine et l'environnement (Pescod, 1992; Qadir *et al.*, 2007).

Tableau 5.2

**Sommaire des estimations de la production et de l'utilisation actuelles de boues en agriculture au Canada et dans différentes régions dans le monde**

Région ou pays	Année	Production annuelle totale (t DS)	Quantité utilisée en agriculture	
			t DS	%
UE27	2007	10 129 500	3 934 660	39
Royaume-Uni	2008	1 372 995	1 112 738	81
Australie et Nouvelle-Zélande	2008/09	380 000	114 150	30
États-Unis	2004	6 513 000	2 354 000	36
Canada	2002	780 175	259 800	33

Sources : LeBlanc *et al.*, 2008; Salado, 2009

Les données de chaque pays membre de l'UE portent sur une période d'un an entre 2002 et 2007.

## 5.6 SEMENCES GÉNÉTIQUEMENT AMÉLIORÉES, VÉGÉTAUX À CARACTÈRES NOUVEAUX ET AUTRES BIOTECHNOLOGIES

Les solutions aux défis qui confrontent la gestion des eaux agricoles dépendent de plus en plus de la biotechnologie, notamment en ce qu'elle touche à l'économie dans la bio-utilisation de l'eau<sup>33</sup>, à la productivité des cultures et à l'efficacité de l'utilisation de l'eau, à la tolérance à la sécheresse et/ou à la salinité, à la tolérance/résistance aux parasites et aux maladies et à l'efficacité des nutriments. La biotechnologie peut aussi contribuer à accroître les rendements et la durabilité par la manipulation de l'architecture de la rhizosphère des cultures et des interactions microbiennes bénéfiques pour les plantes, ainsi que par la détection des réactions des plantes au stress en vue de faciliter une agriculture de précision. Les méthodes classiques de sélection des végétaux, appuyées par la recherche en génomique

33 L'économie dans la bio-utilisation de l'eau : « accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les cultures ou le rendement des cultures par unité d'intrant en eau » (Wang *et al.*, 2007).

végétale et la technologie génique, devraient ouvrir d'importantes possibilités pour réduire la consommation de ressources et augmenter l'efficacité et la durabilité des systèmes agricoles dans l'avenir (Kern, 2002).

### Potentiel de rendement des cultures

Beddington (2010) a observé que les rendements agricoles sont bien inférieurs à leurs valeurs maximales potentielles, même dans les pays développés comme le Royaume-Uni. À titre d'exemple, les rendements des cultures de blé et de colza au Royaume-Uni n'atteignent, respectivement, qu'environ 40 % et 35 % de leur potentiel théorique pour les variétés végétales actuelles. Jaggard *et al.* (2010) ont affirmé qu'il y avait aussi d'importantes variations dans les rendements obtenus sur des fermes différentes qui ne peuvent être attribuées à la nature du sol, à la région ou aux intrants en ressources. Les auteurs soutiennent que ces variations pourraient être associées jusqu'à un certain point à la disponibilité de l'eau, mais que la raison la plus probable est liée aux dommages causés à la structure du sol par le déroulement des opérations sur le terrain dans des conditions non appropriées. Par conséquent, l'amélioration des pratiques fondamentales de culture et d'aménagement des sols pourrait contribuer à accroître sensiblement le rendement actuel des cultures. Cependant, Jaggard *et al.* (2010) entendent avec optimisme des hausses significatives de la productivité des cultures dans l'avenir, principalement par la sélection végétale et les technologies transgéniques visant à accroître les rendements potentiels, la tolérance ou la résistance aux parasites et aux maladies et l'extraction/assimilation des nutriments et des ressources hydriques. Grâce à l'amélioration des technologies agricoles et des obtentions végétales, les auteurs estiment que la production alimentaire pourrait augmenter de 50 % d'ici 2050 par rapport au niveau actuel. Ces prédictions comportent toutefois un degré élevé d'incertitude; Molden *et al.* (2007c) sont arrivés à la conclusion que seules des améliorations modestes à la productivité de l'utilisation de l'eau dans les cultures pourraient être réalisées par la génétique végétale au cours des 15 à 20 prochaines années et que les gains les plus importants pourraient provenir d'une amélioration des méthodes de gestion.

### Tolérance à la sécheresse et économie dans la bio-utilisation de l'eau

Les contraintes liées à l'eau ont une incidence majeure sur la productivité des plantes et le rendement des cultures. Certaines plantes ont cependant développé des mécanismes physiologiques leur permettant de surmonter ces contraintes et on observe un optimisme considérable au sujet du potentiel que laissent entrevoir les semences génétiquement améliorées et les autres biotechnologies pour accroître de façon significative la tolérance à la sécheresse, les économies

dans la bio-utilisation de l'eau et les rendements en introduisant ces caractères dans de nouveaux cultivars améliorés (Cattivelli *et al.*, 2008; Xoconostle-Cazares *et al.*, 2010; Zhengbin *et al.*, 2011).

Les techniques classiques de sélection demandent beaucoup de temps, elles consomment beaucoup de ressources et ont un taux de réussite moins élevé pour ce qui est d'introduire des caractères à faible héritabilité tels que la tolérance à la sécheresse (Khan *et al.*, 2011). Cependant, les progrès de la génomique nous ont permis de mieux comprendre les fondements génétiques de la tolérance à la sécheresse, permettant d'identifier des loci de remplacement de caractères quantitatifs et de les lier à des marqueurs d'ADN pour aider les généticiens à mettre au point des cultivars à haut rendement résistants à la sécheresse (Khan *et al.*, 2011). Même si nous avons réussi à identifier des gènes qui, une fois transférés dans des cultures, améliorent l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la tolérance à la sécheresse, il subsiste des lacunes dans nos connaissances sur les mécanismes moléculaires associés à l'efficacité de l'utilisation de l'eau et à la tolérance à la sécheresse (Zhengbin *et al.*, 2011). Néanmoins, les spécialistes estiment qu'il est possible d'améliorer sensiblement l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les cultures par une combinaison de techniques conventionnelles de sélection végétale et des applications de la biotechnologie moderne (Zhengbin *et al.*, 2011). Les caractères ciblés seront à la fois physiologiques et morphologiques, touchant à l'architecture racinaire mais aussi aux céréales vivaces (Kell, 2011; Kunzig, 2011). Une amélioration de la tolérance à la sécheresse obtenue par sélection végétale classique, par sélection assistée par des marqueurs génétiques et par des manipulations transgéniques a été rapportée pour certaines grandes cultures, comme le maïs, le blé, l'orge, le riz, le coton, le sorgho, le millet, le soja et le haricot commun (Xoconostle-Cazares *et al.*, 2010).

La plupart des sphères de compétence réglementent rigoureusement le rejet dans l'environnement de plantes génétiquement modifiées (GM). Au Canada, le rejet des « végétaux à caractères nouveaux » (VCN) est contrôlé par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA, 2011a). Tel que défini par l'ACIA, « un VCN est une plante qui contient un caractère nouveau pour l'environnement canadien et susceptible de compromettre l'utilisation spécifique et la sécurité de la plante, sur le plan de l'environnement et de la santé humaine. Les caractères peuvent être introduits en ayant recours à la biotechnologie, à la mutagenèse ou à des techniques classiques de reproduction. » (ACIA, 2011a).

Les technologies de pointe (y compris la transgénèse) qui produisent des VCN offrent de nouvelles possibilités pour accroître la productivité et l'efficacité et réduire la consommation de ressources en agriculture (Beddington, 2010;

Jaggard *et al.*, 2010). De nombreuses recherches ont été faites sur les aspects de l'utilisation de cultures transgéniques qui touchent plus particulièrement la santé humaine et la sécurité environnementale<sup>34</sup>. Néanmoins, il y a une certaine résistance publique face aux cultures et aux aliments modifiés génétiquement. La mise au point de VCN, jumelée à des recherches sur leur sécurité et leur incidence pour l'environnement et la santé, sont des domaines où il importe de poursuivre les efforts de recherche. Des évaluations robustes des risques des technologies de pointe, y compris les cultures modifiées génétiquement (voir, par exemple, Parrott *et al.*, 2010), englobant aussi leur acceptabilité sociale, sont envisagées dans certaines sphères de compétence pour donner suite aux préoccupations du public et s'assurer que les normes de sécurité pour l'environnement et les aliments sont respectées (CE, 2010; Talas-Oğraş, 2011).

### Efficiencia des nutrimentos

L'amélioration de l'efficacité des nutrimentos deviendra une priorité de plus en plus grande en vue de maintenir les rendements, de réduire l'utilisation d'engrais à mesure qu'augmentent leurs coûts et les pressions connexes sur l'environnement, de boucler les cycles des nutrimentos et d'atténuer les problèmes et les effets associés aux pertes de nutrimentos agricoles dans l'environnement. L'indice de récolte (c.-à-d. le ratio de la masse exploitable à la masse totale) d'une culture est étroitement lié à l'efficacité de l'utilisation de l'azote; des génotypes végétaux ayant un indice de récolte élevé sont donc requis pour maximiser la récupération de l'azote (Ladha *et al.*, 2005). La variation génétique de l'indice de récolte montre qu'il existe un important potentiel d'accroissement de l'efficacité de l'utilisation de l'azote par sélection végétale (Ladha *et al.*, 2005). Mais contrairement à la tolérance à la sécheresse, le développement de cultivars commerciaux utilisant de façon efficace les nutrimentos n'a eu qu'un succès limité jusqu'à maintenant en raison d'une compréhension insuffisante des facteurs génétiques à l'origine de la réaction des plantes aux nutrimentos et des interactions des plantes avec les variables environnementales (Fageria *et al.*, 2008). Pour résoudre ces problèmes, il faudra élaborer une approche qui englobe la biotechnologie génique moderne et la génomique des plantes avec les méthodes classiques de sélection végétale pour mettre au point des variétés de cultures, des génotypes et des cultivars utilisant les nutrimentos de manière efficace (Fageria *et al.*, 2008). Malgré ces difficultés potentielles, des progrès ont été réalisés récemment en vue de développer des variétés de canola (*Brassica napus* L.) plus efficaces pour l'assimilation de l'azote, et ils sont actuellement évalués dans des essais confinés sur le terrain par l'industrie de la biotechnologie agricole au Canada (ACIA, 2011b).

---

34 Voir, par exemple, CE, 2010.

### Biologie synthétique

La biologie synthétique est définie comme étant la conception et l'élaboration de nouveaux éléments, dispositifs et systèmes biologiques et la reconfiguration de systèmes biologiques existants à des fins utiles (RAE, 2009). C'est une technologie émergente qui pourrait avoir de vastes répercussions en agriculture dans l'avenir (RAE, 2009). Le secteur de la technologie agricole prévoit que la biologie synthétique mènera à une productivité, une rentabilité et une viabilité accrues en augmentant, par exemple, la productivité de l'utilisation de l'eau dans les cultures, l'efficacité de l'utilisation de l'azote, les rendements, la résistance aux parasites, aux maladies et à la sécheresse, ainsi que la qualité, la quantité et les caractéristiques de traitement des produits agricoles (Dunbar, 2011). Cependant, comme pour les méthodes actuelles de manipulation transgénique, les préoccupations en matière de sécurité et de santé que suscite la biologie synthétique devront être abordées de manière responsable et prudente (RAE, 2009).

### 5.7 TECHNOLOGIES À L'APPUI D'UNE AGRICULTURE DE PRÉCISION

L'utilisation optimale des ressources dans les systèmes agricoles, avec un minimum de déchets et d'effets polluants, doit être envisagée de façon systématique et intégrée, ce qui dépend d'une mesure adéquate des paramètres relatifs aux intrants et aux extrants. L'agriculture de précision est un système de gestion qui, grâce à la technologie et à l'interprétation des données, favorise la surveillance environnementale et le contrôle des pratiques agricoles (Roblin et Barrow, 2000). Les objectifs de l'agriculture de précision sont : a) de décrire la répartition spatiale des facteurs ayant une incidence sur la croissance des plantes cultivées, b) de gérer cette variabilité spatiale par l'application de traitements à débit variable de produits agrochimiques et d'engrais en fonction des besoins particuliers du site, c) de maximiser la rentabilité et d) d'atténuer au minimum l'impact sur l'environnement (Roblin et Barrow, 2000).

Les technologies dont disposent actuellement les agriculteurs pour faire de l'agriculture de précision sont notamment : les systèmes de géopositionnement par satellite (GPS); les capteurs installés dans les champs (p. ex. pour mesurer le taux d'humidité dans le sol), les réseaux de capteurs environnementaux sans fil qui facilitent la prise de décisions en temps réel (Díaz *et al.*, 2011; Zerger *et al.*, 2010), les machines permettant l'épandage à débit variable des produits agrochimiques, des pesticides, des engrais et des solides (comme les biosolides provenant de boues d'épuration), les moniteurs de rendement des récoltes, les systèmes informatiques dans les cabines, les logiciels accessibles pour les systèmes de collecte et de stockage des données et de rétrocontrôle, la télédétection,



l'échantillonnage du sol et les systèmes de renseignements géographiques (SRG) (Roblin et Barrow, 2000). Welbaum *et al.* (2004) affirment que des combinaisons de ces technologies permettent de délaisser les « approches inondantes classiques » en gestion agricole au profit de technologies « intelligentes sur le terrain ». Cela requiert des dispositifs électroniques de diagnostic en temps réel contrôlés par ordinateur pour surveiller l'état du sol et des cultures, éclairer les interventions axées sur la production dans un cadre spatial ciblé approprié, atténuer les effets préjudiciables sur l'environnement des pratiques agricoles intensives et abaisser les coûts unitaires de production (Welbaum *et al.*, 2004).

### Mesurer la variabilité spatiale des paramètres des champs et des cultures

Des renseignements précis et détaillés sur la variabilité spatiale des champs sont essentiels en agriculture de précision. Cette variabilité est influencée par de nombreux facteurs, dont le rendement des récoltes, les propriétés du sol et des nutriments, le bilan en nutriments des cultures, le volume et la biomasse du couvert végétal, le contenu en eau, ainsi que les parasites et les maladies. Toutefois, une variété de capteurs et de matériels sont disponibles pour mesurer ces facteurs, par exemple les capteurs électroniques installés dans les champs, la télédétection spectrométrique aéroportée, l'imagerie par satellite et l'imagerie thermique (Lee *et al.*, 2010). Les technologies de détection de la biomasse des cultures, de la présence de mauvaises herbes, des propriétés du sol et des nutriments sont les plus avancées; selon Lee *et al.* (2010), elles sont parvenues à un stade de développement suffisamment avancé pour fournir les données nécessaires à une gestion adaptée au site. Des travaux supplémentaires sont néanmoins requis pour mettre au point des technologies de détection permettant de mesurer à distance et/ou rapidement les conditions du sol, en ciblant notamment celles qui ont une incidence critique sur la croissance des racines et, partant, la productivité des cultures (Clark *et al.*, 2005).

La conductivité électrique du sol (ECa) est l'une des mesures le plus fréquemment employées en agriculture de précision. Tel que décrit par Corwin et Lesch (2005a), cette mesure fournit des renseignements servant : a) à caractériser l'hétérogénéité spatiale de plusieurs propriétés physico-chimiques du sol, b) à repérer les facteurs édaphiques et anthropiques qui peuvent influencer sur le rendement des récoltes et c) à offrir une approche viable pour délimiter les parcelles qui ont des comportements similaires en ce qui a trait à l'écoulement des eaux et au transport des solutés. Les mesures de la conductivité du sol offrent une solution de rechange pour inférer la variabilité spatiale de toute une série de propriétés utiles des sols qui peuvent avoir ou non une influence sur le rendement des cultures. Il est donc nécessaire de calibrer les résultats à l'aide de mesures des sols prises sur le terrain pour déterminer quels sont les facteurs responsables de la réaction de l'ECa

à des interventions directes. Des outils de modélisation avancés sont nécessaires pour faire une interprétation complète de la relation complexe entre l'ECa et l'environnement géophysique (Pellerin et Wannamaker, 2005); cependant, des protocoles pratiques pour assurer la fiabilité, la cohérence et la compatibilité des mesures de l'ECa et leur interprétation sont disponibles (Corwin et Lesch, 2005b).

Les techniques de spectroscopie infrarouge laissent aussi entrevoir la possibilité d'adopter une approche diagnostique quantitative fondée sur des données probantes dans les systèmes de gestion agricole (Shepherd et Walsh, 2007), de même que des possibilités intéressantes de développement de techniques de détection « en mouvement ». Ainsi, après avoir passé en revue les technologies d'évaluation des macronutriments, Sinfield *et al.* (2010) ont conclu que les techniques optiques (p. ex. la spectroscopie par réflectance) offraient le meilleur potentiel de développement d'un système de capteurs intégrés pour la mesure en mouvement de l'azote, du phosphore et du potassium dans le sol. Une nouvelle piste de développement de l'analyse quantitative en mouvement des sols est l'application de la spectroscopie photoacoustique à l'infrarouge, qui offre de nombreux avantages par rapport à la spectroscopie classique par réflectance, dont un prétraitement plus simple des échantillons et l'enregistrement spectral, s'ajoutant à l'acquisition de données plus utiles.

La mesure directe du bilan hydrique des cultures à l'aide de capteurs intégrés aux plantes est directement pertinente à la manière dont fonctionnent les plantes, mais elle dépend de l'interaction complexe entre la plante et son capteur et, ainsi, est plus difficile à interpréter. L'application de cette technique dans les champs s'est butée à des contraintes pratiques (Jones, 2004; Lee *et al.*, 2010). Un exemple de surveillance directe du bilan hydrique des plantes pour établir le calendrier d'irrigation est l'utilisation d'émissions acoustiques (Jones, 2004).

La mesure du taux d'humidité du sol d'une culture est l'une des approches qui permet de déterminer l'apport en eau. D'importants progrès ont été faits vers la mise au point de capteurs solaires sans fil à faible coût et consommant peu d'énergie, fondés sur des principes électromagnétiques, pour mesurer la proportion d'eau dans le sol. Parmi les techniques connexes, il y a la réflectométrie et la capacitance à dimension temporelle, déployées sous forme d'électrodes de mesure directe ou de capteurs à matrice poreuse couplés à un dispositif diélectrique (Bogena *et al.*, 2007; Greenwood *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2009; Varble et Chávez, 2011). Par conséquent, le déploiement d'un grand nombre de sondes pour recueillir des données spatiales détaillées sera possible dans un proche avenir, bien que

la praticabilité et les coûts de cette méthode puissent éventuellement favoriser la détection et la calibration rapide sans contact à l'aide d'un plus petit nombre de capteurs installés dans les champs.

Le bilan hydrique des cultures et du sol peut aussi être évalué par des techniques de télédétection. Des progrès significatifs ont été faits dans le développement de technologies portables de télédétection aérienne et satellitaire, qui sont déjà largement employées pour mesurer la réponse spectrale de la végétation au stress physiologique (Govender *et al.*, 2009). Les mesures de la température et de la réflectance de la surface (dans le spectre rouge et proche infrarouge) obtenues par télédétection peuvent être utilisées pour déceler des indices de stress hydrique (Kustas *et al.*, 2003). Un indice, tel que l'indice de stress hydrique des cultures (ISHC) (Jackson *et al.*, 1981), est utilisé lorsqu'il y a un couvert végétal complet; pour les endroits où il n'y a qu'un couvert végétal partiel (p. ex. aux premières étapes de la plantation des cultures dans les champs), l'indice de déficit hydrique (IDH) est employé (Moran *et al.*, 1994). L'ISHC, qui fournit une mesure du bilan hydrique d'une culture, et l'IDH, qui peut aussi être utilisé pour prédire les déficits en humidité dans le sol et en eau dans les champs, constituent des déclencheurs efficaces pour gérer le calendrier d'irrigation. Par conséquent, les technologies de télédétection reposant sur la thermométrie infrarouge, jumelées à des modèles de stress hydrique, offrent des possibilités intéressantes pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans différents systèmes de cultures agricoles (Alderfasi et Nielsen, 2001; Tanriverdi, 2010).

### Détection des mauvaises herbes et des maladies

Les pesticides utilisés dans les systèmes d'agriculture intensive peuvent contaminer les eaux de surface et les eaux souterraines par le ruissellement et la lixiviation en provenance des sites traités. Diverses stratégies de gestion ont été étudiées pour atténuer ces effets sur l'environnement et les risques pour la santé publique liés aux concentrations de résidus de pesticides détectés dans les sources d'eau potable (Damalas et Eleftherohorinos, 2011; Fageria *et al.*, 2008; Reichenberger *et al.*, 2007). Les principaux développements dans l'application des techniques d'agriculture de précision aux pesticides ont porté avant tout sur la gestion des herbicides dans le but de cibler les traitements dans les champs de manière à réduire la quantité d'intrants, l'impact sur l'environnement et les coûts (Weis *et al.*, 2008). Les techniques de télédétection n'ont pas une résolution suffisante pour constituer un moyen efficace de détection des mauvaises herbes (Moran *et al.*, 1997). Cependant, les méthodes d'identification et de spectroscopie par imagerie (voir, par exemple, Blackshaw *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2001) laissent entrevoir la possibilité d'identifier les mauvaises herbes et de déterminer des seuils, et elles ont démontré la faisabilité des systèmes automatisés de lutte

contre les mauvaises herbes. Néanmoins, la détection efficace des mauvaises herbes demeure le principal obstacle à la mise en place de systèmes automatisés de lutte contre les mauvaises herbes, et des recherches supplémentaires sont requises afin d'améliorer les technologies des capteurs et de leur application (Slaughter *et al.*, 2008; Weis *et al.*, 2008).

### Application à débit variable

L'application à débit variable (ADV) est le dernier maillon critique dans la chaîne des technologies de l'agriculture de précision. Pour une description pratique des techniques d'ADV en agriculture de précision, voir Grisso *et al.*, 2011.

### Gestion adaptée au site

Dans la gestion des cultures, les interventions portant sur les pesticides, les engrais, le fumier et l'irrigation peuvent être ciblées et appliquées avec précision. Pour ce faire, il faut faire appel à des technologies avancées qui permettent d'appliquer automatiquement des doses optimales variant selon le point de traitement, en fonction des caractéristiques du site à des endroits précis, en temps réel, en réponse aux mesures prises à distance ou à l'aide de matériel de captage sur le terrain des besoins des plantes, de la fertilité du sol ou de la présence de mauvaises herbes.

### Pesticides

L'application à débit variable de pesticides est une pratique bien établie. Le matériel conçu pour assurer cette fonction à des degrés divers d'automatisation peut permettre d'atteindre les objectifs suivants : l'ADV basée sur la mesure des flux, l'ADV basée sur la cartographie ou l'ADV basée sur des capteurs (Grisso *et al.*, 2011). L'ajustement automatique du débit des gicleurs pour appliquer le volume requis de pesticides par unité de surface indépendamment de la vitesse des machines utilisées est largement répandu. Ainsi, au Royaume-Uni, 59 % des terres arables étaient traitées avec des pulvérisateurs munis de ce type de système à débit variable en 2004 (Garthwaite, 2004). L'ADV basée sur la cartographie ajuste la concentration du produit appliqué à l'aide d'une carte électronique préalablement établie (ordonnance), liée à un récepteur GPS afin d'assurer le débit souhaité pendant que l'applicateur se déplace dans les champs (Grisso *et al.*, 2011). L'utilisation de pulvérisateurs liés à un système de géopositionnement par satellite (GPS) comptait pour 9 % de la superficie totale des terres arables traitées au Royaume-Uni (Garthwaite, 2004). Les systèmes basés sur des capteurs mesurent les propriétés du sol ou les caractéristiques des cultures à l'aide de capteurs montés sur des véhicules en mouvement, et un système de contrôle utilise ces données pour déterminer la quantité d'intrant requise à l'endroit où le capteur a pris la mesure (Grisso *et al.*, 2011). L'application à débit variable d'herbicides est la technique qui s'est le plus développée. Des systèmes sont

commerciallement disponibles, y compris du matériel fonctionnant à l'aide de capteurs. Cependant, le déploiement d'applicateurs avancés munis de capteurs demeure très limité. Ces technologies laissent entrevoir un potentiel important pour réduire la quantité de pesticides utilisée, qui est l'un des principaux moyens d'atténuer l'impact des pesticides par le biais du drainage et de la lixiviation (Luck *et al.*, 2010; Reichenberger *et al.*, 2007).

### Engrais et fumiers organiques

L'application d'engrais à débit variable (EDV) permet une meilleure répartition de l'engrais dans la rhizosphère et un meilleur ajustement spatial du taux d'application de l'engrais aux besoins des plantes. L'EDV assure un taux maximal de rendement des cultures tout en réduisant la quantité d'engrais employée et la consommation de carburants, et elle comporte des avantages importants pour l'environnement en raison de la réduction des charges en nutriments et des pertes par lixiviation (Galzki *et al.*, 2011; Schumann, 2010).

Contrairement à l'EDV, l'ADV de fumiers solides et liquides, de boues ou de biosolides est limitée. Cependant, les fabricants de matériel offrent des systèmes de contrôle automatisés des cellules de chargement et des taux d'application<sup>35</sup>. Funk et Robert (2003) décrivent les quatre niveaux de contrôle de l'ADV des boues liquides, lesquels s'appliquent aussi aux fumiers solides : a) le contrôle manuel du débit d'épandage, b) le contrôle automatisé du débit d'épandage en fonction de la vitesse au sol, c) les systèmes de positionnement GPS/SIG par cartographie et d) les capteurs montés sur les véhicules pour mesurer le débit à la sortie du réservoir de boues (ce qui facilite la modulation du débit d'application étant donné que le fumier liquide n'est pas uniforme pour ce qui est du contenu en nutriments ou des propriétés fluidiques).

Le coût des systèmes commerciaux d'ADV des fumiers est jugé prohibitif. Cependant, la disponibilité de systèmes de contrôle par positionnement GPS à faible coût et de logiciels de mappage géoréférentiel pourrait augmenter la viabilité de l'application de fumier à débit variable (Dick *et al.*, 2010; Funk et Robert, 2003). Dans une étude récente menée dans le cadre de la Manitoba Livestock Manure Management Initiative<sup>36</sup>, Dick *et al.* (2010) ont montré que les techniques d'EDV par cartographie peuvent être adaptées à l'application du fumier en utilisant un boyau traînant. Cependant, divers problèmes pratiques limitent l'adoption à grande échelle des systèmes d'application de fumier liquide à l'aide de cette technique.

---

35 Voir, par exemple, [http://www.gtunning.co.uk/widebody\\_options.html](http://www.gtunning.co.uk/widebody_options.html)).

36 Voir <http://www.manure.mb.ca/about-us.php>.

Les systèmes de contrôle normatifs pour l'application d'engrais à l'aide de SIG et de systèmes de positionnement GPS peuvent aussi être utilisés avec le matériel de stockage et d'épandage en vrac, ce qui offre l'avantage d'un contrôle automatisé du débit d'application. Des systèmes commerciaux sont déjà déployés avec succès, notamment dans le secteur de l'agriculture contractuelle. L'obtention de données représentatives sur le contenu en nutriments est toutefois une contrainte qui touche tous les types de technologie d'ADV pour l'épandage du fumier. Néanmoins, des progrès ont été faits en vue de développer des techniques de détection en mouvement (p. ex. la spectroscopie du proche infrarouge), lesquelles ont le potentiel de mesurer en temps réel les boues de fumier de bétail et d'en assurer une application précise (Saeys *et al.*, 2004). Des analyses pouvant être effectuées rapidement sur place sont aussi disponibles pour mesurer la composition en nutriments et les propriétés des fumiers et elles peuvent servir à déterminer les taux d'épandage de fumier par ADV, mais ces analyses ont tendance à être plus efficaces pour mesurer le fumier liquide que le fumier solide (Singh et Bicudo, 2005; Van Kessel *et al.*, 1999). Afin de surmonter les autres contraintes potentielles des systèmes d'application ombilicale, Dick *et al.* (2010) ont suggéré qu'il serait possible de profiter des avantages des techniques d'agriculture de précision sur les terres engraisées par l'application d'une première couche de fumier liquide par des méthodes classiques, suivie du recours à des technologies d'application de précision pour l'EDV en fonction des caractéristiques du site, afin d'équilibrer et d'optimiser globalement les intrants en nutriments pour les cultures.

### Irrigation

Contrairement à l'application de précision des pesticides et des engrais, les techniques d'irrigation à débit variable permettant une gestion spatiale de l'irrigation sont un développement relativement récent. Les avantages quantitatifs de l'irrigation à débit variable font intervenir un certain nombre de facteurs, dont la prévention de l'irrigation des zones non cultivées, une réduction des quantités d'eau d'irrigation pour éviter le surapprovisionnement (p. ex. selon la topographie du site) et l'optimisation de l'irrigation en tenant compte de la productivité spatiale (Sadler *et al.*, 2005). Les économies moyennes en eau qu'offre l'irrigation de précision sont de l'ordre de 10 à 15 % comparativement aux pratiques d'irrigation classiques, et elles pourraient atteindre 50 % selon le niveau d'efficacité de l'ancien régime de gestion de l'irrigation. Parmi les autres avantages mentionnés, il y a une augmentation de la superficie récoltable, une diminution de l'incidence des maladies et une réduction de la lixiviation ou du risque de lixiviation des nitrates (Sadler *et al.*, 2005). Ce dernier avantage est lié à une diminution des pertes d'engrais renfermant de précieux nutriments, à la maximisation de la rétention et de l'assimilation potentielle des nutriments dans la rhizosphère et à une réduction des émissions et de l'impact des nutriments

sur l'environnement. Les priorités de la recherche future visant à accroître l'utilité de l'irrigation de précision sont notamment une amélioration des technologies de surveillance en temps réel et des systèmes de soutien décisionnels (Sadler *et al.*, 2005).

### Robotique et logiciels

La robotique agricole est un domaine en évolution rapide et on peut prédire qu'elle fera une contribution de plus en plus grande aux systèmes de production agricole dans un avenir assez rapproché. L'un des principaux avantages d'une approche axée sur des systèmes autonomes en agriculture est l'augmentation de l'efficacité globale et de la précision des opérations en vue d'optimiser les récoltes par une gestion des interventions et des intrants en eau d'irrigation, en pesticides et en nutriments, à des taux adéquats et au moment opportun par rapport au stade de développement de la plante et aux facteurs spatiaux, environnementaux et pédologiques (Bak et Jakobsen, 2004; Blackmore *et al.*, 2005). Globalement, ces avancées permettront une augmentation de la production agricole accompagnée d'une réduction des intrants, du gaspillage et de l'impact subséquent sur l'environnement, ce qui favorisera dans l'ensemble la viabilité des systèmes de production agricole modernes (Cariou *et al.*, 2009; Lopes et Neto, 2010). S'appuyant sur une analyse de système et une étude de faisabilité économique, Pedersen *et al.* (2005) ont aussi montré que les véhicules robotisés autonomes avaient systématiquement une plus grande viabilité économique que les méthodes de mécanisation agricole classiques. Cependant, des défis importants subsistent et les recherches actuelles pointent vers le développement de véhicules autonomes qui permettront un contrôle de précision des machines et une fonctionnalité sur des terres ayant des caractéristiques de surface variables pendant tout le cycle annuel de production (Bak et Jakobsen, 2004; Cariou *et al.*, 2009). Pour profiter pleinement des avantages qu'offrent les systèmes autonomes, il faudra adopter une stratégie favorisant une solide recherche interdisciplinaire visant à intégrer l'expertise dans le domaine des systèmes d'application dans les champs et les technologies de mesure sur le terrain ou de télédétection, et à développer des logiciels avancés pour l'interprétation des données de surveillance des intrants afin de simuler et de contrôler les procédés agricoles (Lopes et Neto, 2010).

## 5.8 FORMULATION DES ENGRAIS ET DES PESTICIDES

Les engrais à libération contrôlée peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote en faisant mieux coïncider la libération des nutriments et les besoins des plantes en comparaison des engrais minéraux solubles classiques. Plusieurs formulations différentes sont disponibles (Ladha *et al.*, 2005). Cependant, si l'utilisation d'engrais à libération contrôlée a doublé au cours des dernières

années, ces produits représentent toujours moins de 0,2 % de tous les engrais azotés qui sont appliqués en raison de leur coût élevé, qui peut atteindre entre 3 et 10 fois celui des engrais classiques (Ladha *et al.*, 2005). L'application d'inhibiteurs de nitrification avec des engrais à base d'ammonium azoté est une autre approche qui permet d'accroître l'efficacité de l'utilisation de l'azote et le rendement des récoltes; 9 % des producteurs de maïs aux États-Unis appliquent des engrais azotés renfermant des inhibiteurs de nitrification (Ladha *et al.*, 2005).

Les responsables de la réglementation gouvernementale et environnementale exigent des formulations améliorées de pesticides qui sont plus sécuritaires, qui ont un impact minimal sur l'environnement et qui peuvent être appliquées à faible dose (voir l'encadré 5.1). Sensible à ces demandes, l'industrie agrochimique s'efforce de mettre au point de meilleures formulations de pesticides qui renforceront la sécurité environnementale (Knowles, 2006, 2008). La technologie de formulation vise à améliorer la sécurité des exploitants, à optimiser l'activité biologique du pesticide de façon à réduire le dosage et les pertes de pesticides appliqués aux récoltes, à atténuer les effets sur l'environnement et à accroître la sécurité des aliments. Le développement de nouveaux pesticides comportant des modes d'action nouveaux et des profils plus sécuritaires, par exemple ceux élaborés à partir de produits naturels (dont les biopesticides microbiens) (Arias-Estévez *et al.*, 2008; Damalas et Eleftherohorinos, 2011; Montesinos, 2003), les extraits de compost fermenté solubles (Scheuerell et Mahaffee, 2002) et les formulations améliorées de pesticides déjà employés par les agriculteurs sont certaines des méthodes préconisées pour réduire les effets potentiellement nocifs des pesticides sur l'environnement (Damalas et Eleftherohorinos, 2011). Des techniques de biologie synthétique seront aussi développées dans l'avenir pour élaborer des pesticides très ciblés dont les modes d'action seront associés à des résidus biodégradables (RAE, 2009).

### **Encadré 5.1**

#### **Formulation des pesticides et protection de l'eau au Canada**

Il faut parfois compter dix années ou plus de recherche scientifique, de développement et d'évaluation gouvernementale avant qu'un pesticide ne soit homologué (Santé Canada, 2011a). Ces travaux, qui se déroulent en laboratoire et sur le terrain, visent à démontrer que le pesticide présente une certitude raisonnable d'absence de dommage à l'environnement, ce qui englobe l'ensemble des organismes vivants, l'air, la terre et l'eau (Ministre de la Justice, 2002). Pour ce qui est de la protection de l'eau, les travaux de recherche et de développement menant à l'homologation du produit visent

*suite à la prochaine page*



à répondre à un certain nombre de questions fondamentales : Comment le pesticide se dégrade-t-il? Quels sont les sous-produits de cette dégradation? Quelle est leur persistance dans l'environnement? Y a-t-il bioaccumulation? Quelle est la mobilité du pesticide dans le sol? S'il atteint les écosystèmes aquatiques, comment influe-t-il sur la santé des organismes aquatiques? Pour répondre à ces questions, des études spécifiques sont entreprises pour déterminer les propriétés physiques et chimiques du pesticide, les procédés de transformation, y compris la dégradation par la lumière et par des moyens chimiques et biologiques, ainsi que la mobilité du produit. Ces données sur le comportement environnemental sont ensuite utilisées parallèlement à des études de toxicologie environnementale pour analyser les effets des pesticides et de leurs principaux métabolites sur des organismes aquatiques non ciblés, dont les poissons et les algues, en vue de préciser le risque pour l'environnement (Santé Canada, 2004; Whitford *et al.*, 2001). Les pesticides font par ailleurs l'objet d'une surveillance et d'une réévaluation continue qui tient compte des dernières normes et des plus récents progrès scientifiques (Santé Canada, 2009b, 2011b) bien que, comme nous l'avons souligné au chapitre 3, il se pose un certain nombre de questions au sujet de l'absence de normes appropriées pour des pesticides individuels et des mélanges de pesticides dans l'environnement aquatique.

Il y a eu également de nombreuses percées dans les pesticides et les technologies d'utilisation des pesticides qui ont permis de renforcer la protection de l'eau (Knowles, 2008; Ozkan, 2009). Plusieurs nouveaux pesticides à risque réduit ont été homologués et comportent des caractéristiques telles qu'un faible impact sur la santé humaine, une plus faible toxicité pour les organismes non ciblés (les oiseaux, les poissons et les plantes), de faibles taux d'utilisation et un faible potentiel de contamination des eaux souterraines (EPA, 2012). Des formulations avancées de pesticides ont permis de réduire les taux d'application, d'éliminer les solvants volatils et d'inclure des bioaméliorations offrant une adhérence, une absorption et une translocation accrues dans la plante (Knowles, 2008). De nouvelles technologies d'application des pesticides ont aussi été mises au point, par exemple des buses à faible dérivée, des applicateurs à débit variable utilisant des capteurs photosensibles et le géopositionnement pour cibler uniquement les parasites et les infestations graves (Ozkan, 2009). De plus en plus, les pesticides sont aussi appliqués au moment des semis dans des formulations élaborées pour le traitement des semences. Le traitement des semences a permis un ciblage plus fin des pesticides afin de protéger la semence et de favoriser directement le développement du tissu végétal, réduisant ainsi le besoin de recourir à de multiples applications (Knowles, 2008).

L'industrie agricole a également fait sienne la lutte antiparasitaire intégrée (LAI) et d'autres PGB. La LAI est le processus par lequel les seuils de dommages causés par les populations de parasites, la biologie des parasites et les diverses techniques de lutte contre les parasites sont envisagés parallèlement à l'application de pesticides de manière holistique (Maredia *et al.*, 2003). Certaines PGB agricoles comme le travail du sol axé sur la conservation et les bandes tampons peuvent réduire le ruissellement et l'érosion et, ainsi, protéger les eaux de surface (Hilliard et Reedyk, 2000). En outre, le programme ontarien Production alimentaire 2002 a montré qu'une réduction de l'utilisation des pesticides pouvait se faire par une sensibilisation des agriculteurs et des recherches ciblées, sans effets négatifs sur les rendements (Gallivan *et al.*, 2001). Ensemble, ces pratiques ont certainement mené à une meilleure gestion des parasites, à une gérance environnementale améliorée et une protection accrue des eaux que ce qui était possible avec les pratiques et les produits chimiques antérieurs.

## 5.9 RÉGULATEURS DE LA CROISSANCE DES PLANTES ET OSMOLYTES

Une autre approche pour la sélection des végétaux et la manipulation génétique en vue d'améliorer la tolérance à la sécheresse est l'application exogène de biostimulants chimiques, y compris des composés organiques (les osmolytes organiques et les régulateurs de la croissance des plantes) et de nutriments minéraux (Ashraf *et al.*, 2011). Récemment, cette stratégie a beaucoup retenu l'attention en raison de son efficacité, de sa faisabilité et de son efficacité élevées sur le plan des coûts et de la main-d'œuvre. Les traitements microbiologiques (p. ex. la bactérie H<sub>2</sub>-oxydante) qui montrent des propriétés de stimulation de la croissance des plantes, notamment l'inhibition de la biosynthèse de l'éthylène qui favorise l'allongement des racines et la productivité de la plante, pourraient aussi déboucher sur des bioengrais prometteurs si l'on arrive à élaborer des formulations réussies (p. ex. sous forme de produits inoculants pour les semences) (Golding et Dong, 2010). L'utilisation de régulateurs de la croissance des plantes pour manipuler l'architecture de la plante et sa floraison est une pratique bien établie dans les exploitations horticoles commerciales. Cette expérience démontre l'efficacité que peuvent avoir ces biostimulants sur le développement de la plante et les réponses physiologiques. Cependant, les modes d'action et les mécanismes d'exécution requis pour manipuler une plante afin qu'elle soit plus tolérante à la sécheresse et assurer la biofertilisation sont encore mal compris, mais on peut penser que la recherche dans ces domaines engendrera des avantages significatifs pour la production agricole à court et à moyen termes (Ashraf *et al.*, 2011).

## 5.10 STABILISATEURS DE SOL

Les polyacrylamides sont employés au Canada et ailleurs dans le monde dans une vaste gamme d'applications industrielles, y compris comme floculants dans le traitement de l'eau et des eaux usées; ils sont aussi utilisés pour prévenir l'érosion des sols (Environnement Canada et Santé Canada, 2009). Les produits d'amendement des sols contenant des polyacrylamides doivent être homologués comme suppléments en vertu de la *Loi sur les engrais* et le pourcentage de monomères d'acrylamide doit être précisé (ACIA, 1997). Le polyacrylamide anionique (PA) est largement utilisé depuis 1995 pour réduire l'érosion des sols provoquée par l'irrigation et améliorer l'infiltration. Sojka *et al.* (2007) ont récemment étudié les propriétés, les avantages et l'utilisation du PA dans la gestion des terres agricoles. Selon l'étude, les propriétés de stabilisation des sols et de floculation du PA permettraient d'améliorer de façon significative la qualité des eaux de ruissellement en réduisant les solides en suspension, l'azote, le phosphore dissout réactif et le phosphore total, le carbone organique dissous (COD), les pesticides, les graines de mauvaises herbes et les microorganismes (p. ex. les agents pathogènes) dans les eaux de ruissellement. Sojka *et al.* (2007) sont arrivés à la conclusion qu'une modification de la gestion de l'eau à l'aide du PA laissait entrevoir de grandes promesses pour la conservation de l'eau et la réduction de l'impact de l'agriculture sur les services écosystémiques. L'efficacité et le faible coût du PA, s'ajoutant à sa facilité d'utilisation, expliquent l'adoption rapide de cette technologie aux États-Unis, où l'on estime que 800 000 hectares de terres agricoles irriguées reçoivent du PA pour gérer l'érosion et/ou l'infiltration.

Les avantages du PA pour la production agricole et l'amélioration de la qualité des eaux de surface dans les bassins de drainage agricoles sont bien documentés. Cependant, même s'il n'y a aucun indice d'impact négatif du PA sur les écosystèmes du sol ou l'environnement, un inconvénient possible est que le PA se dégrade lentement dans le sol, soit à un taux de 10 % par année (Sojka *et al.*, 2007). Dans l'avenir, les biopolymères qui se dégradent plus rapidement recevront probablement un meilleur accueil, et d'autres recherches pour mettre au point des solutions de rechange aux stabilisateurs de sols seraient justifiées (Orts *et al.*, 2007). Cela pourrait aussi être dicté par la hausse des coûts en énergie de la production du PA (Orts *et al.*, 2007).

### 5.11 NANOTECHNOLOGIES

Des applications des nanotechnologies sont actuellement développées pour différentes utilisations agricoles, y compris la détection d'organismes pathogènes et parasites, l'enregistrement des conditions et des propriétés environnementales (telles que l'humidité, l'humidité dans le sol et les contaminants présents dans les eaux souterraines), la libération contrôlée des engrais et des pesticides, l'amélioration de la rétention de l'eau dans le sol et de son absorption par les plantes, et l'administration de médicaments et une meilleure utilisation des nutriments pour le bétail, la dégradation des contaminants organiques et le traitement de l'eau (Kabiri *et al.*, 2011; Knauer et Bucheli, 2009; Manimegalai *et al.*, 2011; Thornton, 2010). À titre d'exemple, des nanocapteurs sans fil peuvent être utilisés conjointement avec la télédétection et des systèmes d'irrigation de précision pour améliorer considérablement l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Des technologies d'application à nano-échelle des engrais et des pesticides pourraient réduire considérablement le ruissellement et la contamination des eaux. La plupart des nanotechnologies en sont encore à leur début et les risques et avantages qu'elles comportent doivent être évalués soigneusement. Néanmoins, ces technologies représentent une approche prometteuse en vue d'obtenir des améliorations plus importantes de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (OCDE, 2010). Mais l'éventualité que les nanotechnologies aient des effets négatifs sur l'environnement et la santé doivent faire l'objet de recherches supplémentaires (Knauer et Bucheli, 2009) et leur application doit reposer sur une évaluation des risques.

### 5.12 TECHNOLOGIES D'ÉLEVAGE

L'industrialisation de la production du bétail peut entraîner une plus grande pollution de l'air et de l'eau. Cependant, les développements dans les techniques de reproduction, de nutrition et de santé animale continueront à faire progresser le potentiel de production, l'efficacité et les gains génétiques, et contribueront à atténuer les effets sur l'environnement (Thornton, 2010). À titre d'exemple, dans les régions développées, la reproduction des animaux d'élevage demeurera centrée sur la productivité, mais elle contribuera aussi à améliorer le bien-être des animaux et leur résistance à la maladie (pour réduire l'emploi de médicaments et d'antibiotiques) et à diminuer l'impact sur l'environnement (p. ex. la production de méthane) (Thornton, 2010). Comme dans le cas de la sélection végétale, le domaine de la génétique moléculaire devrait avoir une incidence profonde sur

L'amélioration des pratiques d'élevage, et la sélection génomique pourrait plus que doubler le taux de gain génétique dans l'industrie laitière, par exemple. La complexité des effets des techniques de reproduction visant à accroître l'efficacité de l'utilisation des ressources et l'impact connexe sur d'autres caractéristiques, y compris la fertilité des animaux et les répercussions environnementales (p. ex. la production de méthane), nécessiteront des évaluations pansystémiques à l'aide de méthodes d'analyse sur le cycle de vie pour établir le bilan coûts-avantages (Hayes *et al.*, 2009; Thornton, 2010). D'autres recherches s'imposent pour améliorer l'efficacité de la conversion des aliments pour animaux, ce qui pourrait faire une contribution importante à l'amélioration globale de la productivité de l'utilisation de l'eau dans les systèmes de production animale axés sur les aliments et le fourrage (Peden *et al.*, 2007).

Parmi les facteurs reconnus en vue d'améliorer la productivité globale de l'utilisation de l'eau dans les activités d'élevage il y a notamment : 1) un accroissement de l'utilisation des résidus et des sous-produits des récoltes, 2) le pacage sur des parcours bien gérés qui ne se prêtent pas aux cultures, 3) la gestion de la distribution des ressources alimentaires pour mieux faire correspondre l'offre et la demande, 4) l'adoption de pratiques de gestion axées sur la conservation de l'eau et 5) la sélection d'animaux adaptés aux conditions de sécheresse (Peden *et al.*, 2007). De meilleures méthodes d'alimentation, grâce notamment à une augmentation des quantités de concentrés ou à l'amélioration de la qualité des pâturages, pourraient contribuer à abaisser la production de méthane; les émissions pourraient aussi être réduites par divers additifs diététiques. Cependant, leur efficacité et leur viabilité comme mesure d'atténuation des gaz à effet de serre nécessiteraient des recherches supplémentaires. Des possibilités intéressantes s'offrent également pour améliorer la productivité de l'eau dans la production animale; mais contrairement à l'abondante littérature qui existe sur les liens entre les cultures et l'eau, beaucoup d'autres recherches et connaissances sont requises sur les interactions entre l'élevage et l'eau (Peden *et al.*, 2007).

### Points saillants du chapitre

- Les développements dans les technologies agricoles progressent rapidement et joueront un rôle clé pour concrétiser les attentes en ce qui a trait à l'accroissement de la productivité agricole, parallèlement à l'adoption d'une approche davantage axée sur la conservation et sensible aux écosystèmes et à l'adaptation à une concurrence plus vive pour les ressources hydriques à court et à moyen termes et au changement climatique à plus long terme.
- Les domaines de recherche prioritaires sont notamment l'amélioration de la productivité de l'utilisation de l'eau et des nutriments dans les cultures et l'élevage et la résistance aux maladies; une approche interdisciplinaire axée sur les systèmes d'agriculture de précision et d'agriculture intelligente, y compris la robotique et les capteurs installés sur le terrain, la modélisation et le développement de logiciels, les nanotechnologies, la formulation des pesticides et des engrais, les biopailles fluides, ainsi que les technologies de traitement à faible coût pour protéger les écosystèmes aquatiques. L'accent devrait être mis sur les technologies susceptibles de contribuer le plus à l'amélioration de la productivité de l'utilisation de l'eau, à l'atténuation des effets sur l'environnement et à l'amélioration globale de la productivité et de la résilience de la production agricole.
- Outre ces besoins fondamentaux en recherche, des programmes de démonstration à l'échelle de l'exploitation agricole constitueraient un moyen efficace pour illustrer les avantages et l'application pratique de technologies émergentes qui en sont au stade de la « pré-commercialisation » et prêtes à être déployées à plus grande échelle, afin de stimuler leur adoption.
- Des services de vulgarisation pour diffuser de l'information et conseiller les agriculteurs sur les nouvelles technologies sont également nécessaires afin d'assurer le déploiement efficace et l'adoption des développements issus de la recherche et de la technologie.
- Il y aurait des avantages à intégrer et à examiner les données de recherche et l'expérience acquises par le Canada dans la gestion des systèmes d'irrigation, la récolte de l'eau de pluie et de la neige soufflée par le vent, et la conception et le fonctionnement des zones humides artificielles (en particulier leur rendement en période de froid et comme source d'eau d'irrigation), afin de pouvoir élaborer des guides de meilleures pratiques, ou réviser ceux qui existent, sur l'application ou l'amélioration du fonctionnement de ces technologies.

# 6

## **Bâtir les assises d'une gestion durable de l'eau en agriculture**

- **L'évolution du contexte de la gouvernance et de la gestion de l'eau au Canada**
- **Instruments économiques à l'appui d'une gestion durable de l'eau**
- **Transfert de connaissances et stratégies de mobilisation des parties intéressées**
- **L'emploi d'outils efficaces de gouvernance et d'élaboration des politiques à l'appui d'une gestion durable de l'eau en agriculture**

## 6 Bâtir les assises d'une gestion durable de l'eau en agriculture

### Aperçu

Les décisions relatives à la gestion de l'eau qui visent à promouvoir la durabilité doivent prendre en considération la valeur économique, environnementale et sociale de l'eau. L'adoption de structures de gouvernance, de techniques d'évaluation, d'incitatifs économiques et de stratégies de transfert des connaissances appropriés tenant compte de ces valeurs est essentielle pour parvenir à une utilisation durable de l'eau en agriculture. Des recherches supplémentaires dans ces domaines sont requises afin de favoriser de meilleures décisions de gestion, d'améliorer l'adoption de pratiques durables et de permettre à la collectivité agricole de d'établir des liens de travail plus étroits avec d'autres secteurs et parties intéressées afin de surmonter les défis intersectoriels qui se posent.

La gestion durable de l'eau en agriculture passe par la satisfaction des besoins des parties intéressées et de l'environnement, tout en gérant la ressource de façon à en préserver la disponibilité pour les générations futures. Dans les chapitres précédents, nous avons examiné les pratiques et les technologies reconnues pour contribuer à une gestion durable de l'eau. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur les assises nécessaires à la mise en œuvre de ces pratiques. Le comité d'experts croit que ces assises partent d'une gouvernance efficace et de l'application d'instruments économiques et de stratégies de transfert des connaissances appropriés qui favorisent l'adoption de comportements au niveau individuel, collectif et sectoriel qui contribuent à une gestion durable de l'eau en agriculture.

### 6.1 L'ÉVOLUTION DU CONTEXTE DE LA GOUVERNANCE ET DE LA GESTION DE L'EAU AU CANADA

Le terme *gouvernance* a trait aux façons dont les sociétés s'organisent pour prendre des décisions et passer à l'action dans un contexte comme celui de la gestion de l'eau (Folke *et al.*, 2005). Une préoccupation particulière porte sur les façons dont les décisions sont prises, les personnes et les organisations qui interviennent dans ces décisions et les différents rôles qu'ils jouent. De nos jours, les processus de gouvernance de l'eau au Canada sont diversifiés et ils englobent des approches réglementaires traditionnelles, des mécanismes de collaboration, des processus axés sur le marché – et des combinaisons de tous ces éléments (de Loë et Kreutzwiser, 2007; Hill *et al.*, 2008). La présente section donne un bref aperçu des principaux



acteurs et institutions qui participent à la gouvernance de l'eau au Canada (en soulignant ceux qui sont pertinents à la production agricole)<sup>37</sup>. Après ce bref aperçu, les grands principes et les pratiques qui peuvent contribuer à donner une assise plus solide à la gouvernance de l'eau sont examinés.

### L'organisation de la gouvernance de l'eau au Canada

Historiquement, la gouvernance de l'eau au Canada a procédé du sommet vers la base, les organismes gouvernementaux assumant un rôle de leadership et étant redevables de leurs décisions (de Loë et Kreutzwiser, 2007). La gouvernance de l'eau est érigée sur ces assises à l'heure actuelle au Canada. Les responsabilités attribuées par la Constitution au gouvernement fédéral et aux provinces n'ont pas changé; par conséquent, ces paliers de gouvernement sont et demeureront les acteurs clés dans la gouvernance de l'eau. Cependant, la gouvernance recourt de plus en plus aux marchés et à d'autres instruments économiques, à des codes de pratique volontaires, à des partenariats, à des conseils multipartites ainsi qu'à divers modèles de planification et de décision partagées ou concertées. Il s'ensuit que la responsabilité pour les fonctions liées à la gouvernance de l'eau est aujourd'hui réparties entre un large éventail d'acteurs gouvernementaux et non gouvernementaux, y compris l'industrie privée et des groupes industriels, les peuples autochtones, le secteur public, des organismes non gouvernementaux et des citoyens concernés par ces questions. En raison de cette évolution, la gouvernance de l'eau au Canada est beaucoup plus complexe aujourd'hui qu'au cours des générations précédentes. En conséquence, toute une série de nouveaux défis se posent en lien avec l'efficacité, la capacité, la légitimité et l'obligation redditionnelle. La compréhension inégale de la meilleure façon d'aborder ces défis est une problématique qui représente un important domaine de recherche future.

La Constitution canadienne énonce les grandes lignes de la gouvernance de l'eau au Canada. Elle confère des pouvoirs au gouvernement fédéral et aux provinces (Saunders et Wenig, 2007). Ces pouvoirs sont partagés, ce qui donne lieu à un système très fragmenté selon les analystes (voir, par exemple, Bakker et Cook, 2011). Les plans d'eau situés entièrement à l'intérieur des frontières d'une province relèvent de la compétence des provinces en vertu de la constitution. Les principaux domaines de responsabilité provinciale sont la régulation du débit, la répartition de l'eau, la lutte à la pollution et le développement de l'énergie thermique et hydroélectrique (Environnement Canada, 2011c). Il n'est donc pas étonnant qu'il y ait une variation considérable d'une province à l'autre dans la façon dont

---

37 Il y a peu d'activité agricole dans le Nord du Canada, la gouvernance de l'eau est passablement différente que dans les provinces. Ainsi, la documentation présentée ici ne traite pas de la gouvernance dans les territoires du Canada.

l'eau est régie. À titre d'exemple, dans le cas de la répartition de l'eau, un système d'attribution préalable est employé en Alberta. La répartition de l'eau se fait par l'octroi de permis, et les détenteurs de permis de rang supérieur (plus anciens) ont priorité sur les détenteurs de permis de rang subalterne. Tel qu'indiqué plus loin dans ce chapitre, les détenteurs de permis en Alberta ont l'autorisation légale de transférer leurs droits par les mécanismes du marché (Alberta Environnement, 2003). Par contre, en Ontario, les personnes qui souhaitent consommer plus de 50 000 litres d'eau par jour doivent obtenir un permis du gouvernement provincial. Il n'y a pas d'ordre de priorité parmi les détenteurs de permis. Par conséquent, lorsqu'il y a pénurie, le gouvernement provincial tente d'assurer l'équité parmi les utilisateurs (Ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2005). Pour les utilisateurs d'eau agricole, il en résulte une sécurité d'accès à l'eau hautement variable selon la province dans laquelle ils se trouvent (de Loë *et al.*, 2009).

Le gouvernement canadien détient une série de pouvoirs clés en vertu de la Constitution, mais ils sont définis plus étroitement que ceux attribués aux provinces. Le pouvoir fédéral porte sur des éléments spécifiques tels que les parcs nationaux, les réserves des Premières Nations et les autres terres fédérales, le poisson et l'habitat du poisson, les eaux navigables, ainsi que les eaux qui s'écoulent au-delà des frontières provinciales/territoriales et de la frontière internationale entre le Canada et les États-Unis. Dans l'administration fédérale, plus d'une vingtaine de ministères et organismes détiennent des responsabilités ayant trait à l'eau douce (Environnement Canada, 2012b).

De nombreux autres acteurs jouent aussi des rôles clés dans la gouvernance de l'eau au Canada. Tel que mentionné précédemment, les Premières Nations du Canada relèvent de la responsabilité fiduciaire du gouvernement fédéral en vertu de la Constitution. Cependant, comme le souligne Phare (2009), par suite des revendications territoriales et des accords et traités d'autonomie gouvernementale, de l'enchâssement des droits des Autochtones dans la Constitution et de l'affirmation périodique des droits des Autochtones par la Cour suprême du Canada, les peuples autochtones possèdent des droits uniques au Canada – en tant que gouvernements et en tant que détenteurs de droits individuels – d'être des participants actifs dans la prise des décisions relatives à l'eau.

La Constitution n'attribue pas de responsabilités particulières aux municipalités pour la gestion de l'eau. Cependant, des responsabilités importantes pour la distribution de l'eau potable et la planification du territoire leur ont été déléguées sous l'empire de lois provinciales. Les municipalités ont aussi la responsabilité de procéder régulièrement à des échantillonnages et à des analyses de l'eau pour s'assurer qu'elle est sécuritaire et qu'elle répond aux normes provinciales (McFarlane

et Nilsen, 2003). Les municipalités participent aussi à plusieurs programmes de surveillance en collaboration avec l'industrie, des organismes publics et agricoles, de même qu'avec les universités. Les avantages de ces programmes sont le partage des coûts et une utilisation plus efficiente des données recueillies (Harker *et al.*, 2000).

Dans les bassins hydrographiques partagés avec les États-Unis, la Commission mixte internationale, un organisme binational créé en vertu du *Traité limitrophe de 1909*, a pour mission de prévenir et de résoudre les différends liés aux sources d'eau partagées par les deux pays (Findlay et Telford, 2006). Il y a des bassins d'eau partagés un peu partout au pays, depuis l'aquifère international Abbotsford-Sumas dans l'Ouest du pays jusqu'au bassin de la rivière Saint-Jean dans l'Est. Les agriculteurs établis à proximité de ces bassins et aquifères sont touchés par les décisions que prennent les deux pays. À titre d'exemple, la quantité d'eau disponible pour l'agriculture irriguée dans le bassin de la rivière Oldman en Alberta est déterminée en partie dans une ordonnance émise par la Commission mixte internationale en 1921 (Halliday et Faveri, 2007).

La tendance croissante au partage des responsabilités avec des intervenants de l'extérieur des gouvernements a fait en sorte que des citoyens, des organisations non gouvernementales (ONG) et des entreprises privées sont devenus des acteurs clés dans la gouvernance de l'eau. Au cours des 30 dernières années, les ONG ont ainsi assumé un rôle de plus en plus important dans la gouvernance de l'eau au Canada. Cela englobe la participation aux consultations, l'éducation populaire, l'échange de renseignements et la recherche. En suscitant l'intérêt du public pour les questions relatives à l'eau, les ONG ont aussi une grande influence dans le débat public sur la politique de l'eau (Bakker et Cook, 2011).

Enfin, des organisations multipartites – certaines créées par les gouvernements et d'autres qui sont apparues grâce à des appuis populaires – jouent aussi un rôle clé dans la planification et, parfois, l'élaboration des politiques ayant trait à l'eau (voir l'encadré 6.1). Ces organisations peuvent prendre des décisions et des initiatives qui ont des répercussions sur le secteur agricole. Par conséquent, les agriculteurs sont hautement motivés à participer à leurs activités (Murray et de Loë, 2012). Ainsi, en 2000, au lendemain de la contamination de la source d'approvisionnement en eau de la municipalité de Walkerton, en Ontario, des comités de protection des sources ont été créés dans la province en vue d'élaborer des plans détaillés à l'échelle des bassins hydrographiques précisant les menaces auxquelles sont exposées les sources d'approvisionnement en eau potable et de définir des mesures précises pour les contrer. Les terres agricoles et certaines pratiques agricoles largement répandues sont à l'origine de bon nombre des menaces qui sont ressorties de ce processus (Ontario, 2009). Par conséquent, en

reconnaissance du fait que les plans élaborés par ces comités toucheront directement les producteurs, le tiers de leurs membres doivent provenir des secteurs agricole, commercial ou industriel de la région où le comité a compétence (Ontario, s.d.).

### **Encadré 6.1**

#### **Les organismes de bassins versants au Québec**

En 2002, le gouvernement du Québec a mis en application une nouvelle politique de l'eau qui prévoyait une gestion intégrée des bassins hydrographiques (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2002). Cette approche fait appel à des groupes sans but lucratif pour chaque bassin hydrographique, constitués de représentants publics et privés, y compris des agriculteurs et des représentants des ONG concernées. Les gouvernements sont aussi représentés au sein des groupes responsables des bassins hydrographiques, mais ils ne peuvent voter (Robins, 2007). La politique de l'eau du Québec oblige ces organismes à avoir une représentation équilibrée afin que toutes les parties intéressées puissent participer aux décisions (Nowlan et Bakker, 2010). Ces groupes élaborent un plan directeur de l'eau pour leur bassin hydrographique qui est ensuite approuvé par la province (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2002). Les groupes responsables de chacun des bassins hydrographiques de la province peuvent compter sur le soutien du Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ), qui les représente après des instances gouvernementales (Robins, 2007). Le ROBVQ facilite l'échange de renseignements entre les organismes des bassins hydrographiques et il conçoit et distribue des outils de formation, de suivi et de gouvernance (Robins, 2007).

La compétence fragmentée sur les eaux au Canada est souvent mentionnée comme un obstacle à la gouvernance et à la gestion de l'eau (Bakker et Cook, 2011; Hoover *et al.*, 2007; McFarlane et Nilsen, 2003). Étant donné que plusieurs paliers de gouvernement et un large éventail de parties non gouvernementales interviennent, il y a un besoin accru de coordination et de collaboration afin que les rôles et les responsabilités soient bien définis, que l'on aborde les questions qui chevauchent les frontières et les sphères de compétence et que la durabilité des ressources hydriques soit assurée (Bakker et Cook, 2011; Hoover *et al.*, 2007). Devant ce besoin, il y a eu des appels de plus en plus pressants au cours des cinq dernières années en vue de renforcer la coordination et de mieux rationaliser la gouvernance de l'eau au Canada, dans des rapports venant d'organisations telles que le Gordon Water Group (Morris *et al.*, 2007), Pollution Probe (2007)

et l'Association canadienne des ressources hydriques (de Loë, 2008). Ces rapports traitent principalement de la gouvernance et de la gestion de l'eau au sens large. Néanmoins, chacun énumère clairement toute une série de défis pour le secteur agricole découlant de l'approche non coordonnée et fragmentée actuelle, tout en soulignant des façons dont le secteur agricole pourrait profiter d'une approche mieux coordonnée en matière de gouvernance de l'eau. Une importante priorité pour la recherche est de préciser les conséquences de cette approche fragmentée pour l'agriculture et de définir des moyens de mieux aborder ces préoccupations.

### Principes d'une gouvernance efficace

De nombreuses administrations se sont attaquées à la tâche d'élaborer des cadres de gouvernance plus efficaces pour assurer une gestion durable des ressources hydriques. Comme le décrivent les rapports du Comité mondial de l'eau et d'autres, une gouvernance efficace est essentielle pour soutenir l'application d'innovations techniques et l'utilisation de PGB (Cosgrove et Rijsberman, 2000b; Tropp, 2007). À défaut d'une gouvernance efficace, il y a une limite à ce qui peut être fait en misant uniquement sur la technologie et les PGB. Bien qu'aucun cadre unique ne convienne à toutes les situations et à toutes les sphères de compétence (en raison de différences entre les régimes juridiques, les structures institutionnelles et les contextes socio-économiques) (Tropp, 2007), le comité d'experts estime que l'efficacité d'un certain nombre de principes a été démontrée pour appuyer une gestion durable des ressources hydriques aux fins de l'agriculture, d'autres activités humaines et de l'environnement.

### *S'assurer que la gouvernance de l'eau s'effectue à l'échelle appropriée*

L'échelle appropriée pour la gouvernance de l'eau varie selon le contexte. Pour de nombreux problèmes liés à l'eau qui concernent l'agriculture, l'échelle locale est celle qui importe. Tel qu'évoqué dans les chapitres précédents, il arrive souvent que des ressources hydriques ne soient pas situées à l'intérieur des limites d'une municipalité, d'un comté, d'une province ou même du pays, et de nombreux paliers de gouvernement et groupes peuvent avoir des responsabilités et des intérêts divergents à l'égard d'une ressource hydrique particulière. Cela signifie que les décisions et les initiatives pertinentes à un palier ou à un endroit peuvent se répercuter sur d'autres. On reconnaît généralement que le bassin hydrographique peut constituer le niveau approprié pour les décisions et les mesures de coordination (Nowlan et Bakker, 2010; TRNEE, 2010a). Ainsi, il serait peu logique d'engager des efforts pour améliorer la qualité de l'eau en aval sans la collaboration des partenaires en amont, puisque la pollution en amont pourrait anéantir les efforts déployés en aval. De façon similaire, la surveillance des prélèvements dans une partie seulement d'un

bassin hydrographique pourrait ne pas convenir si les changements dans les débits d'eau d'autres parties du système hydrologique peuvent avoir un impact majeur sur la quantité d'eau disponible dans la région surveillée.

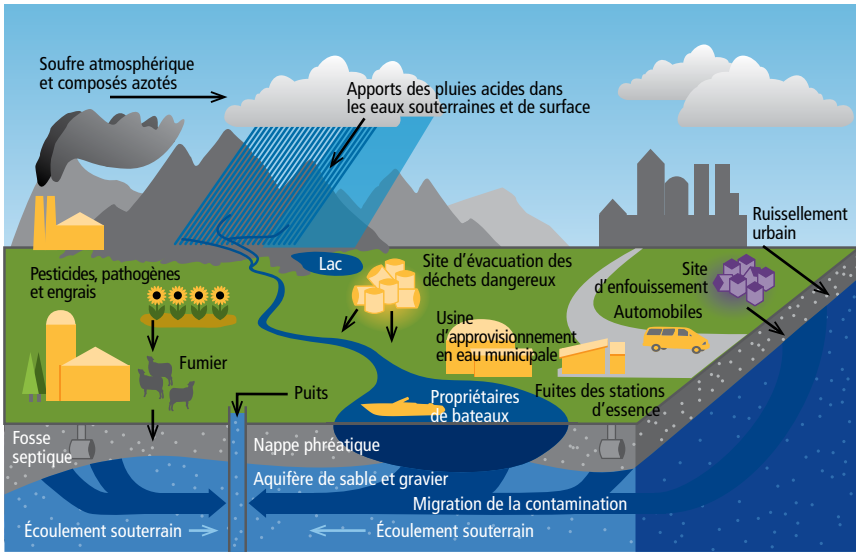
La gestion des ressources hydriques à l'échelle appropriée permet l'intégration des efforts de gestion et des connaissances, ce qui favorise une gouvernance plus efficace des ressources hydriques (TRNEE, 2010a). Au cours des dernières années, il y a eu une évolution vers un modèle de gouvernance qui tient compte des préoccupations locales et du rôle des bassins hydrographiques; les organismes des bassins versants du Québec et les comités de protection des sources en Ontario en sont des exemples. Toutefois, des approches au niveau de bassins hydrographiques visant à mobiliser les acteurs locaux existent depuis longtemps et précèdent ces initiatives. Les offices de protection de la nature de l'Ontario, organisés à l'échelle locale, constituent peut-être le meilleur exemple à cet égard. La *Loi sur les offices de protection de la nature* de 1946 renferme des dispositions pour la création de ces offices. Depuis 1946, 36 offices de protection de la nature ont vu le jour en Ontario pour gérer des ressources hydriques et d'autres ressources naturelles au niveau d'un bassin hydrographique. Les offices de protection de la nature s'appuient sur des partenariats avec des municipalités, qui fournissent les membres siégeant à leur conseil d'administration (Mitchell et Shrubsole, 1992). Les budgets de fonctionnement de ces offices sont, en moyenne, financés par des revenus autonomes (42 %), des contributions perçues par les municipalités (33 %), des subventions provinciales et de projets spéciaux (23 %), ainsi que des subventions et des contrats fédéraux (2 %) (Conservation Ontario, 2011). Au total, 90 % de la population de l'Ontario vit dans un bassin hydrographique géré par un office de protection de la nature. Dans l'ensemble, ces offices ont eu beaucoup de succès en Ontario en collaborant avec les autorités municipales, provinciales et fédérales pour élaborer des solutions communautaires à des problèmes touchant des ressources naturelles (Conservation Ontario, 2011).

Ce qui est plus important, le rôle que devraient jouer les bassins hydrographiques (et d'autres frontières naturelles) au niveau de la *gouvernance* (par opposition à la *gestion*) dépend aussi du contexte. À titre d'exemple, la littérature sur la gouvernance de l'eau reconnaît que les bassins hydrographiques jouent un rôle de premier plan dans l'identification des principaux rapports entre l'eau et la terre et aident à définir les populations et les collectivités qui partagent des intérêts communs du fait qu'elles sont établies dans le même bassin hydrographique. Cependant, cette littérature soutient de plus en plus que l'organisation de la gouvernance en fonction des limites des bassins hydrographiques est problématique (voir, par exemple, Cohen et Davidson, 2011). À titre d'exemple, choisir les limites d'un bassin hydrographique parmi les nombreuses possibilités qui s'offrent est souvent une décision politique

plutôt que scientifique. De façon plus pragmatique, les instances qui ont la légitimité politique pour prendre ces décisions et pour en rendre compte (comme les provinces et les municipalités) ont des frontières qui ne correspondent pas nécessairement à celles des bassins hydrographiques (Cohen et Davidson, 2011). Dans le contexte de l'agriculture, un autre problème est lié au fait qu'on ne peut prendre pour acquis que les agriculteurs tiennent compte du bassin hydrographique (qui est une unité hydrologique). À titre d'illustration, dans une étude du rôle du bassin hydrographique dans le secteur agricole en Ontario, les auteurs ont constaté que les agriculteurs s'identifiaient davantage à leur comté qu'au bassin hydrographique local (Ferreyra *et al.*, 2008). Ainsi, en considérant l'échelle la plus appropriée pour la gouvernance, il importe de s'assurer que l'échelle retenue est pertinente et appropriée aux besoins du secteur agricole.

### *Intégrer la planification de l'utilisation des terres aux décisions relatives à la gestion de l'eau*

Un consensus émerge de la littérature et parmi les professionnels sur le besoin d'intégrer la planification de l'utilisation des terres aux décisions relatives à la gestion de l'eau pour l'unité appropriée de gestion et d'analyse de l'eau (p. ex. le bassin hydrographique, le bassin fluvial ou la nappe d'eau souterraine) (voir, par exemple, de Groot *et al.*, 2010; Millenium Ecosystem Assessment, 2005). L'utilisation des terres et la gestion de l'eau sont étroitement liées. Ainsi, l'utilisation des terres en agriculture peut influencer sur la quantité d'eau (p. ex. en raison des prélèvements d'eau pour l'irrigation) et la qualité de l'eau (p. ex. en raison du ruissellement d'engrais ou de pesticides) dans un bassin hydrographique (voir la figure 6.1). Il en va de même des autres utilisations du territoire et des décisions de gestion, y compris le développement de parcours de golf, la construction de barrages hydroélectriques ou la construction de quartiers résidentiels dans les banlieues. Les considérations environnementales, esthétiques et culturelles doivent également entrer en ligne de compte parce que les décisions relatives à l'utilisation des terres et à la gestion de l'eau peuvent avoir une incidence sur les habitats fauniques, les risques d'inondation et plusieurs autres aspects du territoire et des écosystèmes locaux. Du même coup, les utilisations des terres et de l'eau apportent certains avantages aux collectivités locales, notamment des aliments, des possibilités récréatives, de l'énergie électrique et des emplois. L'intégration des décisions relatives à l'utilisation des terres et à la gestion de l'eau peut contribuer à maximiser les résultats qui en découlent pour le plus grand nombre d'intéressés tout en réduisant au minimum les répercussions des décisions prises sur l'environnement, l'économie et la société.



Adapté d'une figure originale de groundwater.org avec la permission de Groundwater Foundation  
©2012 The Groundwater Foundation. Tous droits réservés.

**Figure 6.1**  
**Activités humaines influant sur l'eau de source**

Malheureusement, les efforts faits en pratique pour intégrer les terres et l'eau ont des résultats mitigés. Plusieurs des problèmes qui se posent sont liés à la complexité et à la fragmentation décrites dans la sous-section précédente. En termes simples, il y a tellement d'interconnexions (voir la figure 6.1) que le nombre d'acteurs sera toujours élevé, et ces acteurs auront des mandats, des pouvoirs et des intérêts divergents. En conséquence, le consensus qui se dégage progressivement de la littérature est que les efforts d'intégration simplistes, reposant sur la création d'organismes spécialisés ou l'imposition d'exigences additionnelles pour réaliser l'intégration, ne conviennent pas (voir, par exemple, Cervoni *et al.*, 2008). Les chercheurs s'efforcent plutôt de reformuler le problème en termes de coordination et de collaboration. À titre d'exemple, Fish *et al.* (2010) insistent sur la nécessité d'adopter des approches axées sur la collaboration qui peuvent s'accommoder des interactions et des incertitudes caractéristiques de la gestion contemporaine de l'eau. Dans une évaluation de la planification de l'utilisation des terres et de la gestion des bassins hydrographiques en Ontario, Plummer *et al.* (2011) ont démontré que l'intégration pouvait se faire grâce à une meilleure reconnaissance des liens et des rapports qui existent entre les outils de planification.



### *Associer les parties intéressées au processus décisionnel*

Les décisions relatives à la gestion de l'eau peuvent toucher de multiples façons la vie des gens établis dans un bassin hydrographique, en ayant une incidence sur les industries qui peuvent s'y implanter, les conditions environnementales et même les installations récréatives. Étant donné que les décisions relatives à la gestion de l'eau peuvent aussi comporter des arbitrages entre ces utilisations concurrentes et d'autres, il importe non seulement d'intégrer les opinions et les préoccupations des groupes susceptibles d'être touchés par ces décisions, mais aussi de les faire participer à la prise de décision. Les expériences observées un peu partout dans le monde incitent à penser qu'il y a trois grands avantages à retirer d'une telle approche (Ansell et Gash, 2008; Reed, 2008). Premièrement, les décisions reposant sur la collaboration et la participation ont plus de chance d'être considérées comme étant légitimes au sein de la collectivité. Deuxièmement, la légitimité des approches concertées à la prise de décision peut aussi renforcer l'adhésion des parties intéressées et même faciliter l'appui de la collectivité à l'application des politiques. Troisièmement, la participation à la prise de décision des groupes concernés peut aussi améliorer l'accès qu'ont les responsables des politiques et les décideurs à de précieux renseignements, que ce soit sous la forme de préférences exprimées par ces groupes ou de connaissances pratiques sur la nature du territoire ou du bassin hydrographique.

Les formes précises de collaboration et les outils permettant d'intégrer la participation varieront selon les circonstances locales et le genre de décisions à prendre. De nombreux processus formels et informels de mobilisation des citoyens dans les structures de gouvernance des ressources en eau existent au Canada. Parmi ceux-ci, il y a les avis publics habituels, la consultation et les modalités d'appel prévues dans les régimes juridiques de la gestion de l'eau de chaque province. Les élections sont un autre moyen par lequel les citoyens peuvent exprimer leur avis aux représentants élus. Du point de vue de la gouvernance, les processus de collaboration, qui sont de plus en plus courants au Canada et ailleurs dans le monde, représentent une tendance importante et relativement nouvelle. Tel que noté précédemment, ces processus ont fait évoluer la mobilisation du public d'une simple consultation à un rôle limité dans la prise de décision et la mise en œuvre des plans. Parmi les exemples que l'on peut citer, il y a les organismes de bassins versants du Québec et les comités de protection des sources de l'Ontario. De nombreux autres exemples formels et informels existent au Canada (p. ex. les équipes d'intervention en matière de ressources en eau de l'Ontario, les Watershed Planning and Advisory Committees en Alberta) (de Loë et Kreutzwiser, 2007; Nowlan et Bakker, 2010). Compte tenu de l'importance de l'eau pour l'agriculture

et de la nature extensive des exploitations agricoles au Canada, il est essentiel que les agriculteurs, individuellement et collectivement, en viennent à participer plus efficacement à ces processus.

### *Intégrer les connaissances au processus décisionnel*

Une prise de décision efficace en matière de ressources hydriques passe par l'intégration de connaissances scientifiques et d'autres formes de savoir. Tel qu'évoqué tout au long du présent rapport, les analyses et les données scientifiques peuvent nous informer sur les changements qui surviennent dans la disponibilité et la qualité de l'eau, l'efficacité des PGB et beaucoup d'autres éléments pertinents aux décisions de gestion des ressources hydriques. Les outils d'évaluation économique sont une autre source clé de renseignements essentiels à la prise de décision. La science peut servir d'outil pour éclairer ces décisions et aider les parties intéressées à comprendre les arbitrages réels, les coûts et les avantages de diverses stratégies de gestion, ainsi que le coût de ne rien faire (CAC, 2009; NAS, 2009). Mais pour constituer un outil efficace, les connaissances scientifiques doivent s'appuyer sur des analyses et des données solides. En outre, les renseignements scientifiques doivent être considérés comme étant pertinents par les décideurs, en accordant l'attention requise à la gamme complète des incertitudes et des scénarios de risque potentiel qui se rattachent à une décision.

Outre les connaissances scientifiques, une gestion et une gouvernance efficaces de l'eau nécessitent des renseignements tirés de l'expertise pratique, du savoir traditionnel et des connaissances locales (NAS, 2004b; Tress *et al.*, 2006). L'intégration des connaissances scientifiques et d'autres formes de savoir dans les processus décisionnels peut aboutir à des solutions plus robustes qui tiennent davantage compte de la nature complexe et interdépendante des problèmes actuels de gestion et de gouvernance de l'eau (Raymond *et al.*, 2010). De nombreux obstacles entravent l'intégration des différentes formes de connaissances. Les modèles de « coproduction » des connaissances sont souvent préconisés comme moyen de placer sur un pied d'égalité les différents contributeurs de connaissances (Corburn, 2003).

La recherche transdisciplinaire est une façon de faciliter la coproduction de connaissances. En recherche transdisciplinaire, les chercheurs et les membres de la collectivité sont des partenaires égaux dans la définition des problèmes et des approches adoptées pour étudier ces problèmes (Tress *et al.*, 2006). Ce genre de recherche peut aussi aider à préciser les coûts et les avantages de diverses formes d'utilisation des terres, de gestion des terres et de décisions relatives à la gestion de l'eau, ainsi que les conséquences réciproques des décisions prises dans l'un ou l'autre de ces domaines. Cela permet de mieux faire ressortir les arbitrages

et la répartition des coûts et des avantages. Des outils tels que l'analyse de scénarios et l'analyse décisionnelle multicritère peuvent aussi servir à appuyer la prise de décision, tandis que des outils économiques et de communication peuvent être mis à contribution pour promouvoir des choix et des pratiques de gestion durable. La gestion des terres et des eaux dans le bassin de la rivière Oldman offre un exemple des avantages qui peuvent être obtenus lorsque plusieurs de ces outils sont employés simultanément, en permettant de prendre des décisions plus éclairées et de plus haute qualité (voir l'encadré 6.2).

### **Encadré 6.2**

#### **La science à l'appui des décisions dans le bassin de la rivière Oldman**

Le bassin de la rivière Oldman couvre environ trois millions d'hectares dans le Sud de l'Alberta et plus de 160 000 personnes y vivent, dont près de la moitié à Lethbridge (Koning *et al.*, 2006). On y trouve une grande variété de végétaux, allant de forêts de conifères à des prairies et des pâturages indigènes. Le bassin abrite également une importante activité agricole puisque 57 % des terres sont occupées par des exploitations agricoles, principalement la culture du canola et des céréales (Oldman Watershed Council, 2005).

En 1997, les préoccupations au sujet de la détérioration de la qualité de l'eau ont mené à la création de l'Oldman River Basin Water Quality Initiative (OMRBWQI). À l'époque, il y avait peu de renseignements factuels disponibles et l'expansion agricole et les activités urbaines étaient souvent pointées du doigt comme sources possibles de contamination (Koning *et al.*, 2006). Les objectifs de l'OMRBWQI étaient de documenter la qualité des eaux de surface dans la région, d'examiner les liens entre l'utilisation des terres et la qualité de l'eau et de faire ressortir tout sujet de préoccupation. En faisant appel à l'analyse scientifique, l'initiative visait à déterminer si les préoccupations des résidents étaient valides et sur quels points des améliorations devraient être apportées.

Au cours des cinq premières années, l'OMRBWQI a recueilli des échantillons d'eau à 108 endroits à une fréquence allant de bihebdomadaire à mensuelle. Ces échantillons furent analysés par le personnel technique du gouvernement pour y déceler divers contaminants, y compris des nutriments, des sédiments dissouts, des pesticides et des coliformes fécaux, dont *E. Coli* (Koning *et al.*, 2006). Des données sur le débit de la rivière ont été recueillies à des sites où le ministère de l'Environnement de l'Alberta et la Division des relevés hydrologiques du Canada avaient installé des

*suite à la page suivante*

jauges permanentes. Le ministère de l'Environnement de l'Alberta et Environnement Canada, ont aussi fourni des données météorologiques. Des renseignements sur les affluents plus petits ont été recueillis par du personnel de terrain qui a procédé à des mesures des débits sur place.

Ces données ont démontré que, de façon générale, la qualité de l'eau dans la rivière était bonne et dépassait presque toujours les lignes directrices des gouvernements du Canada et de l'Alberta (Oldman Watershed Council, 2005). Cependant, certains aspects soulevaient aussi des inquiétudes. On a observé que la qualité de l'eau était sensible aux débits et à la quantité de précipitations; durant les années plus humides, la qualité de l'eau était moins bonne, un indice que les charges à la source pouvaient constituer un problème (Koning *et al.*, 2006). Bien que l'on ait constaté que les eaux en amont avaient une qualité allant de bonne à excellente, la qualité de l'eau se détériorait à mesure qu'elle s'écoulait en aval. La qualité de l'eau dans les ruisseaux soumis au ruissellement agricole et urbain se situait dans l'intervalle de pauvre à passable (Oldman Watershed Council, 2005). Des pesticides ont été détectés dans certains échantillons d'eau, mais la fréquence de détection des pesticides était égale ou supérieure dans les poches d'eaux pluviales urbaines en comparaison des écoulements de restitution des systèmes d'irrigation agricole. D'autres types de contaminants ont aussi été observés dans la rivière et il a été établi que la contamination provenait de tout un éventail de sources, dont la faune, la production agricole et, peut-être, les eaux usées humaines (Koning *et al.*, 2006).

L'analyse des données scientifiques recueillies et la consultation des principaux groupes intéressés dans la région du bassin hydrographique ont abouti à la mise en œuvre de meilleurs programmes de gestion dans l'ensemble du bassin, rejoignant à la fois les collectivités rurales et les collectivités urbaines. Cela englobait des PGB en milieu rural, par exemple l'installation de clôtures d'exclusion du bétail en bordure de la rivière, la création de bandes tampons, la relocalisation de certaines activités d'élevage, et l'éducation des résidents au sujet de la gestion de l'eau en région urbaine (Koning *et al.*, 2006). Grâce à la collecte de données suffisantes sur la qualité de l'eau, la collaboration et une bonne compréhension des enjeux, les changements apportés ont permis d'améliorer la santé du bassin hydrographique de la rivière Oldman.

### **Prendre acte des défis sur le plan de la gouvernance et s'y attaquer**

La gestion durable des ressources hydriques nécessite une gouvernance efficace. Une observation fondamentale issue de l'examen fait par le comité d'experts de la littérature sur la gouvernance de l'eau et de l'environnement est que les solutions simplistes, convenant à toutes les situations, n'existent pas. Bien au contraire, les rôles que les principaux acteurs peuvent et devraient jouer dans

la prise de décision, les échelles appropriées auxquelles les décisions devraient s'appliquer, ainsi que les outils et les approches qui conviennent le mieux à la gouvernance dans une région donnée sont intimement liés au contexte. Les expériences observées un peu partout dans le monde témoignent généralement de l'engagement des acteurs non gouvernementaux dans le processus décisionnel et pointent dans le sens d'une plus grande place pour les approches axées sur la collaboration comportant un partage des responsabilités et une mise en commun des ressources. Cependant, les expériences canadiennes et internationales attirent aussi l'attention sur des problèmes communs de gouvernance liés aux nouvelles façons de gouverner (Armitage *et al.*, 2012). Ainsi, des questions de légitimité et d'obligation redditionnelle surgissent lorsque des partenariats organisés localement pour un bassin hydrographique et des organismes de collaboration participent à la prise de décision. De façon similaire, les efforts visant à intégrer la prise de décision pour divers contextes, comme la planification de l'utilisation du territoire, le développement économique et la gestion de l'eau, soulèvent des interrogations quant au degré d'intégration qu'il est possible de réaliser et à la façon d'harmoniser des objectifs de politique potentiellement conflictuels. Il est essentiel de prendre acte de tels défis sur le plan de la gouvernance et de s'y attaquer afin d'assurer une gestion durable des ressources hydriques en agriculture.

## **6.2 INSTRUMENTS ÉCONOMIQUES À L'APPUI D'UNE GESTION DURABLE DE L'EAU**

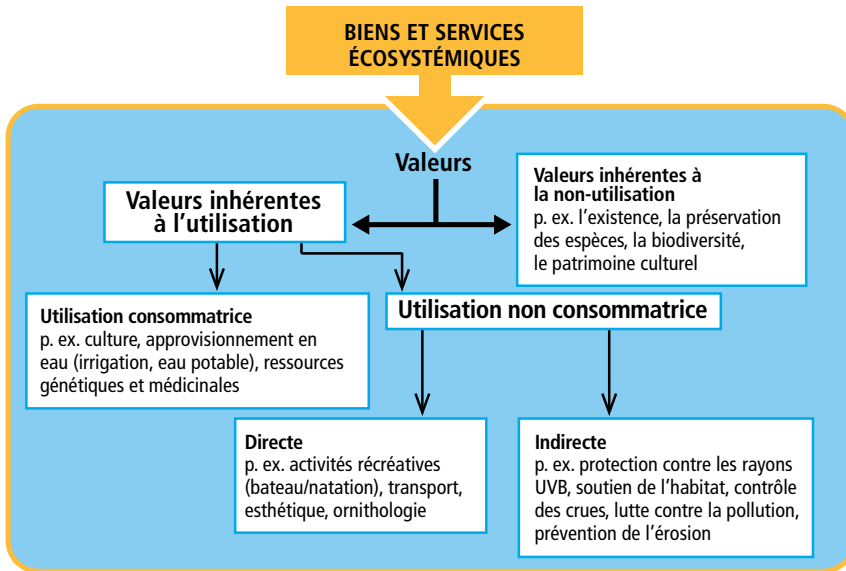
La présente section examine les instruments économiques qui peuvent être utilisés pour appuyer la prise de décision au sujet de l'eau et influencer les comportements des utilisateurs de cette ressource. Les instruments économiques ne sont évidemment pas les seuls outils disponibles pour influencer les comportements. Cependant, les expériences réalisées dans les diverses régions du pays et ailleurs dans le monde montrent que, lorsqu'ils sont conçus et appliqués de façon appropriée, les instruments économiques peuvent concourir à une gestion durable de l'eau. Cette section examine plus particulièrement le rôle que peuvent jouer les techniques d'évaluation économique, les incitatifs économiques, les prix et les marchés de l'eau en rapport avec l'agriculture au Canada.

### **Techniques d'évaluation économique**

De nombreux universitaires, responsables des politiques et professionnels de la gestion de l'eau sont d'avis que la détermination de la pleine valeur de l'eau (y compris les biens et services écosystémiques qu'elle procure) est une étape importante en vue de surmonter les effets de désincitation à la conservation qui sont inhérents aux caractéristiques de « ressource commune » de l'eau, et de promouvoir une meilleure gérance des ressources hydriques (Millenium Ecosystem Assessment, 2005; NAS, 2004c). Les économistes ont mis au point

diverses techniques d'évaluation qui peuvent faciliter la prise de décision au sujet des utilisations concurrentes de l'eau, ainsi que des instruments de politique qui peuvent encourager une utilisation efficace de l'eau et des comportements axés davantage sur la durabilité. Pour être efficaces, ces techniques et ces outils doivent prendre en compte une gamme étendue de valeurs potentielles, de même que la nature des écosystèmes où se trouvent les ressources hydriques (Millenium Ecosystem Assessment, 2005; NAS, 2004c).

La détermination d'une valeur économique totale (VET) pour les services écosystémiques est l'une des techniques qui est ressortie pour établir la valeur des écosystèmes soutenus par les ressources hydriques (voir la figure 6.2). Un avantage de cette approche est qu'elle offre un moyen d'établir à la fois la valeur de l'eau utilisée (p. ex. pour l'irrigation ou l'eau potable) et non utilisée (p. ex. la biodiversité, le patrimoine culturel). La valeur liée à l'utilisation peut elle-même être scindée en utilisations consommatrices et non consommatrices, ces dernières incluant à la fois des utilisations directes (p. ex. les activités récréatives, le transport) et indirectes (comme la lutte contre la pollution, le soutien des habitats).



Adapté de NAS, 2004c

Figure 6.2

### Un cadre d'évaluation économique complète (EEC)

Cette figure illustre l'approche de l'évaluation économique complète pour établir la valeur des biens et services écosystémiques. À noter que cette approche vise à inclure les valeurs inhérentes à l'utilisation (p. ex. l'irrigation, les activités récréatives) et à la non-utilisation (p. ex. la biodiversité, le patrimoine culturel).

Divers outils et approches peuvent être employés pour déterminer ces valeurs. Les outils d'évaluation économique classiques englobent ceux qui visent à révéler les préférences par le biais de choix et de comportements en situation réelle (p. ex. les prix du marché, les coûts de déplacement et les outils hédonistes), ceux qui identifient les préférences énoncées dans les réponses à des questions portant sur les valeurs perçues (p. ex. les évaluations contingentes) et, enfin, ceux qui estiment les valeurs à partir des coûts liés à l'évitement des pertes (p. ex. le coût de remplacement et les techniques du coût d'évitement) (Aylward *et al.*, 2010; Farber *et al.*, 2006; NAS, 2004c). Diverses méthodes d'évaluation non monétaires existent également (comme le fait de demander aux gens d'indiquer leurs préférences; de solliciter les opinions d'experts au sujet des choix qui produiront des résultats optimaux, et des groupes de discussion composés de citoyens) (Aylward *et al.*, 2010; NAS, 2004c; DAES, 2006).

Les principaux problèmes que soulève l'approche de la valeur économique totale (VET) est sa complexité intrinsèque et sa « contestabilité ». Selon un rapport publié en 2004 par les National Academies of Science des États-Unis, la détermination de la valeur des services écosystémiques peut se révéler particulièrement difficile parce que les « écosystèmes sont complexes, dynamiques, variables, interreliés et non linéaires, et parce que notre compréhension des services qu'ils fournissent et de la façon dont ils sont touchés par les activités humaines est imparfaite et difficile à quantifier » [traduction] (NAS, 2004c). De plus, en raison de son importance pour le soutien de la vie et des nombreuses autres valeurs non monétaires qui se rattachent à l'eau (p. ex. la valeur culturelle de l'eau, la valeur esthétique d'un paysage), certains intervenants rejettent entièrement les efforts visant à établir la valeur économique de l'eau (DAES, 2006). Même lorsque les valeurs non monétaires sont prises en compte dans la « valeur totale », il y a souvent largement place au désaccord sur les méthodes appropriées d'évaluation, l'importance à donner à chaque évaluation et la façon d'intégrer ces évaluations à une politique de l'eau et aux décisions de gestion (Aylward *et al.*, 2010).

En dépit de ces préoccupations, on reconnaît de plus en plus l'utilité des approches axées sur l'évaluation qui combinent les techniques économiques classiques et les techniques d'évaluation non monétaires pour mieux rendre compte de la « pleine valeur » des ressources hydriques (DAES, 2006). Ces méthodes pourraient éventuellement être intégrées à divers outils d'aide à la prise de décision, par exemple l'analyse de scénarios ou l'analyse décisionnelle multicritère afin d'en arriver à une meilleure compréhension des coûts et des avantages de différents modes d'action. Les décisions concernant la façon dont les ressources hydriques seront utilisées doivent provenir des autorités politiques et administratives appropriées, en tenant compte de l'éventail complet des préférences des parties intéressées

et des autres paramètres économiques et institutionnels. Néanmoins, les méthodes d'évaluation sont un puissant outil pour éclairer les décisions et forger les consensus requis à l'appui d'une application efficace de la politique (voir Belton et Stewart, 2002; CAC, 2011; NAS, 2009).

Point important, les conséquences pour l'agriculture du mouvement vers la prise en compte de la VET de l'eau demeurent imprécises. Ainsi, dans la plupart des cas où l'eau est utilisée comme intrant dans la production agricole, celui-ci n'est pas substituable. Les plantes ont besoin d'eau pour croître et les animaux doivent s'abreuver. Cependant, tout en reconnaissant clairement le besoin de disposer de meilleurs renseignements sur la valeur (économique, environnementale et sociale) de l'eau, le comité soutient que l'évaluation des conséquences d'un mouvement vers la VET de l'eau pour l'agriculture devrait constituer une priorité pour la recherche.

### **Incitatifs économiques**

Les incitatifs économiques sont un autre mécanisme pouvant contribuer à changer les comportements afin de préserver la quantité et la qualité des ressources hydriques. Parmi les exemples qui viennent à l'esprit, il y a les incitatifs monétaires à l'adoption volontaire de PGB et la tarification des services écosystémiques (TSE). Chacun de ces outils a des avantages et des inconvénients qui devraient être pris en compte dans la poursuite d'objectifs particuliers.

Les mesures incitatives peuvent prendre la forme de montants versés pour l'adoption de certaines PGB, comme dans le cas du Programme de gestion agroenvironnementale Canada-Saskatchewan (PGACS) (AAC et Ministère de l'Agriculture de la Saskatchewan, 2011). Le PGACS offre aux agriculteurs une somme allant jusqu'à 50 000 dollars pour couvrir les coûts de mise en œuvre de PGB, par exemple l'adoption de méthodes d'agriculture de précision (comme des contrôleurs à débit variable pour l'épandage des engrais et du fumier), la plantation de végétaux pour protéger les berges des cours d'eau et les zones riveraines, ou la construction de clôtures périphériques pour protéger l'environnement contre le bétail. Pour être admissibles au programme, les agriculteurs doivent élaborer un plan agroenvironnemental démontrant comment leurs initiatives atténueront les risques que présentent leurs opérations pour l'environnement. Ils doivent aussi assumer un pourcentage des coûts (le montant dépend de la nature des PGB). Des programmes similaires ont été adoptés dans d'autres sphères de compétence, comme en Ontario et au Manitoba (AAC, 2007b; Ontario Soil and Crop Improvement Association, 2010). Une évaluation d'un programme partagé de ce genre en Ontario, le Programme de qualité des eaux rurales de l'Ontario, a déterminé que les incitatifs financiers étaient un facteur important dans l'adoption volontaire d'une PGB par les agriculteurs (Dupont, 2010).



Les programmes de PGB assortis de mesures incitatives peuvent éventuellement limiter le besoin d'adopter une réglementation plus contraignante. Cependant, l'efficacité économique et environnementale de ces programmes doit faire l'objet d'un suivi continu. S'ils ne sont pas ciblés adéquatement, certains programmes incitatifs peuvent tout simplement servir à subventionner des agriculteurs pour des investissements qu'ils auraient faits dans certaines PGB de toute façon (comme de meilleures technologies d'application des pesticides). Dans certains cas, plutôt que d'offrir un incitatif financier, il serait préférable de promouvoir l'adoption de ces types de PGB par des programmes de communication et de sensibilisation visant à présenter aux agriculteurs les avantages commerciaux de l'adoption volontaire de telles mesures – contribuant ainsi à réduire ou à éliminer le montant de la subvention à verser. Dans d'autres cas, les résultats des PGB sur le plan environnemental peuvent être insuffisants par suite d'une adoption limitée dans le cadre d'un programme volontaire, notamment du fait que les coûts en ressources financières et humaines liés à l'adoption sont plus élevés (Young et Karkoski, 2000) et que les agriculteurs ne sont pas convaincus du rendement qu'ils obtiendront sur leur investissement (Sparling et Brethour, 2007). Tel qu'indiqué au chapitre 4, les avantages de certaines PGB ne sont pas clairement établis, notamment pour un endroit donné par rapport à un autre, ce qui soulève des questions au sujet de l'efficacité économique des mesures incitatives à l'adoption. L'environnement physique et social de la localité doit aussi être pris en considération au moment de déterminer si une PGB convient à un secteur et si des incitatifs financiers sont appropriés et nécessaires.

Des incitatifs directs peuvent être créés pour la prestation des services écosystémiques. L'approche de la TSE vise à établir des liens de marché plutôt que de recourir à des subventions ou à une formule de partage des coûts. Cette approche mise aussi sur les relations contractuelles entre les fournisseurs de certains services écosystémiques, par exemple un agriculteur dont les pratiques peuvent favoriser la rétention de l'eau, et un acheteur qui représente la demande publique ou privée pour un tel service. En théorie, ces relations inciteraient le producteur-vendeur à concevoir une approche efficace et peu coûteuse pour offrir ces services (Bohlen *et al.*, 2009; Shabman et Stephenson, 2007).

Bohlen *et al.* (2009) décrivent un projet pilote de TSE dans le Nord des Everglades, aux États-Unis, où les éleveurs sont payés pour améliorer la rétention de l'eau et réduire le ruissellement de résidus de phosphore provenant de leurs pâturages et ainsi améliorer la qualité de l'eau dans le réseau de lacs environnants. La demande pour ces services a été créée par le biais de plusieurs règlements environnementaux qui visent à restaurer et protéger les écosystèmes naturels des Everglades. Des agences de l'État agissent comme acheteurs en puisant dans une enveloppe

de trois millions des dollars de fonds publics, à laquelle s'ajoute une contribution équivalente d'une fondation privée. Bien que le projet ait réussi à améliorer la qualité de l'eau et des écosystèmes, il a fait ressortir les défis suivants, souvent présents dans les formules de TSE :

- L'identification et la documentation des services environnementaux qui, dans bien des cas, ne sont pas faciles à quantifier et à vérifier, soulignant le besoin d'une approche peu coûteuse pour la surveillance et la confirmation de la prestation des services achetés.
- L'élaboration de modèles de contrats et de paiements garantissant des déboursés réguliers et réduisant les risques financiers pour les agriculteurs, notamment lorsque la prestation des services requiert un investissement initial dans l'infrastructure de gestion de l'eau.
- La gestion de l'interface et du chevauchement avec des organismes de réglementation et des programmes, par exemple les organismes responsables de la gestion de l'eau ou les programmes environnementaux qui réglementent ou contrôlent les activités que l'agriculteur doit entreprendre pour assurer la prestation du service (Bohlen *et al.*, 2009).

Outre ces difficultés, le projet de TSE dans la région du Nord des Everglades a mis en relief l'importance d'associer les parties concernées de même que l'impact bénéfique que peut avoir un « entrepreneur social », en l'occurrence l'organisme de conservation, qui est perçu comme un courtier neutre et qui peut aider à préciser les objectifs du projet, à établir les rapports contractuels et à prodiguer des conseils en cas de différend (Bohlen *et al.*, 2009).

Le programme Alternative Land Use Service (ALUS), en cours au Manitoba, en Ontario, en Alberta, en Saskatchewan et à l'Île-du-Prince-Édouard, est l'un des principaux exemples pratiques de l'approche de la TSE. À l'instar d'autres programmes de même nature, le programme ALUS verse des paiements aux agriculteurs pour la prestation de services écosystémiques tels que la préservation des terres humides (ALUS, 2011; Gouvernement du Manitoba, s.d.). Les expériences menées en Europe, où l'approche de la TSE est utilisée dans le cadre de la Politique agricole commune, laissent penser qu'une telle initiative comporte certains avantages (Power, 2010). À titre d'exemple, une enquête réalisée dans cinq pays européens a révélé que les programmes agroenvironnementaux engendraient des effets positifs variant de marginaux à modérés sur la biodiversité (Kleijn *et al.*, 2006). En Amérique du Nord, l'utilisation des modèles de TSE en est à ses débuts. Le concept pourrait être utile en vue d'établir d'autres pistes de financement pour la préservation de l'eau dans les territoires agricoles, tout en exploitant la dynamique du marché pour élaborer des approches offrant un

bon ratio coût-efficacité. Des recherches sont toutefois requises afin de déterminer dans quelle mesure la TSE pourrait contribuer à une gestion durable de l'eau dans le secteur agricole canadien.

### Les prix

Les prix sont un mécanisme du marché pouvant promouvoir des comportements durables en créant une incitation économique à améliorer les pratiques de gestion de l'eau. Dans de nombreux endroits, le prix demandé pour l'eau ne tient compte que du coût de livraison et non de la « valeur totale » de la ressource, qui englobe le coût de renonciation, les coûts économiques externes, ainsi que les coûts sociaux et environnementaux. Hausser le prix de l'eau pour qu'il reflète la valeur totale de la ressource et le coût total de la prestation des services liés à l'eau représente une façon de promouvoir une utilisation plus efficiente des ressources hydriques (DAES, 2006). Dans une telle approche, le prix tient compte des coûts de renonciation et de tout dommage causé à des tiers, en plus des coûts de fonctionnement, d'entretien et de remplacement de l'infrastructure hydrique (DAES, 2006). Cependant, cette approche soulève généralement certains problèmes, entre autres la réticence à payer pour une ressource essentielle longtemps considérée comme un « bien public » et qui a de tout temps été fournie à faible coût, et le malaise engendré par la possibilité que les coûts plus élevés puissent réduire l'accès à l'eau pour les citoyens démunis (DAES, 2006).

Les problèmes de ce genre sont représentatifs du contexte de l'approvisionnement en eau en milieu urbain. Dans le contexte agricole, toute une série d'autres problèmes surgissent. Tel qu'évoqué aux chapitres 2 et 3, les volumes d'eau utilisés par les agriculteurs peuvent être très importants. Dans de nombreuses régions du Canada, les exploitants agricoles s'approvisionnent eux-mêmes en eau en la puisant dans les rivières, les lacs et les aquifères avec leur propre matériel. Ainsi, l'imposition d'un prix pour l'eau équivaldrait à la perception d'une redevance par le gouvernement provincial plutôt qu'à un droit destiné à couvrir le coût de la prestation du service. Là où les agriculteurs reçoivent de l'eau de systèmes centralisés, comme c'est souvent le cas en Alberta, en Saskatchewan et en Colombie-Britannique, une tarification semblable à celle des municipalités pourrait être utilisée. Cependant, des questions importantes se posent au sujet de la capacité des agriculteurs de payer davantage pour l'eau. Plus fondamentalement, dans certains secteurs de production agricole il y a des limitations importantes à la capacité de conserver l'eau. À titre d'exemple, 80 % de la demande d'eau dans une exploitation d'élevage représentative sert à abreuver les animaux (Agriculture Canada et Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario, 1994); ainsi, la capacité des éleveurs de réduire l'utilisation d'eau grâce à une plus grande efficacité est limitée en comparaison des autres secteurs.

Le comité d'experts est arrivé à la conclusion que les problèmes de cette nature peuvent être résolus dans certains secteurs, mais cela nécessitera la collaboration des parties intéressées en vue d'établir des prix différents pour différents usages (p. ex. l'eau potable, l'eau d'irrigation, les utilisations industrielles de l'eau). Il faudra aussi accorder l'attention requise aux principes d'équité et de justice ainsi qu'aux avantages sociaux et privés de certaines utilisations de l'eau (Horbulyk, 1995; DAES, 2006). La simplicité, la transparence et la prévisibilité sont également des caractéristiques essentielles à la réussite d'une telle approche, pour s'assurer que les barèmes de prix sont bien compris par tous les intéressés (DAES, 2006). Des mesures incitatives pour accroître l'efficacité (en aidant les utilisateurs à abaisser leurs coûts à mesure que les prix montent) pourraient être mises en œuvre simultanément afin de permettre aux exploitants qui sont prêts à investir pour améliorer leur efficacité d'absorber plus facilement certaines hausses de coûts (créant de ce fait un « double incitatif »). L'élaboration d'une combinaison appropriée de politiques de prix requiert des négociations, un suivi, une évaluation et des ajustements continus. Cependant, il faudrait faire des recherches supplémentaires pour déterminer s'il est possible d'accroître plus efficacement l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture par des mécanismes de prix que par d'autres mesures (p. ex. la réglementation, les mesures incitatives à la modernisation de l'infrastructure).

### Les marchés de l'eau

Les droits d'utilisation de l'eau échangeables sont un autre mécanisme du marché qui pourrait être employé pour promouvoir une utilisation efficace des ressources hydriques car ils permettent de déplacer l'eau des secteurs où cette ressource a peu de valeur vers d'autres secteurs où elle a une valeur plus élevée – parfois, au sein même du secteur agricole, mais souvent de l'agriculture vers des utilisations non agricoles. Les marchés de l'eau supposent habituellement le transfert du droit d'utilisation de l'eau en fonction « du type d'utilisation, du lieu d'utilisation, du point de diversion ou du moment de l'utilisation » [traduction] (Gouvernement australien, 2011b; Libecap, 2010; Veeman *et al.*, 1997).

Divers mécanismes ont été élaborés pour le transfert temporaire ou permanent de l'eau au moyen d'outils économiques. Parmi ceux-ci, il y a les banques d'eau, qui offrent aux acheteurs et aux vendeurs une institution centrale et des barèmes de prix établis; les marchés avec babillards électroniques, qui fonctionnent comme les banques d'eau mais sans institution centrale pour établir les prix; les marchés à doubles enchères où les acheteurs et les vendeurs soumettent des offres scellées pour l'eau; les marchés dérivés, où des options et des contrats à terme sont utilisés pour échanger temporairement de l'eau; et les programmes de location et d'achat environnementaux, dans le cadre desquels de l'eau d'irrigation est achetée afin d'accroître le débit de certains cours

d'eau (Hadjigeorgalis, 2009). En établissant une forme de « droit de propriété » pour une attribution particulière de l'eau, les marchés pour les droits échangeables visent à inciter les utilisateurs à pratiquer la conservation en leur permettant d'échanger avec d'autres utilisateurs les quantités d'eau excédentaires dont ils n'ont pas besoin. Il pourrait en résulter des investissements dans des technologies plus efficaces, de meilleures pratiques de gestion ou un déplacement des utilisations moins productives vers des utilisations plus productives (p. ex. en passant à des types de cultures utilisant moins d'eau). Les échanges sur un marché peuvent aussi aider à déplacer l'eau des secteurs où il y a des surplus vers ceux où il y a des pénuries (que les déséquilibres soient attribuables aux débits normaux ou à la variabilité du climat), aidant ainsi à équilibrer les besoins des utilisateurs à la grandeur d'une région. En outre, de nombreux analystes affirment que cela pourrait également promouvoir l'investissement dans l'infrastructure et les méthodes qui permettent d'améliorer la conservation de l'eau et d'accroître la productivité de l'eau dans un secteur (voir Anonyme, 2009; Grafton *et al.*, 2009; Rosegrant et Gazmuri, 1995; Thobani, 1995). Les échanges d'eau sur le marché sont aussi employés en Australie dans un effort visant à améliorer les conditions environnementales.

Bien qu'une faible partie seulement des ressources hydriques de la planète soit gérée en faisant appel aux mécanismes du marché, des marchés ont été créés à divers endroits pour permettre l'échange des droits d'utilisation de l'eau. Ces marchés se trouvent principalement au Chili, en Australie et dans l'Ouest des États-Unis (Bjornlund et McKay, 2002; Hadjigeorgalis, 2009). En tant que fédération et pays du Commonwealth, l'Australie est un exemple particulièrement pertinent pour le Canada. Après une série de réformes mises en place dans les années 1990 et 2000, les marchés de l'eau sont devenus un élément clé des régimes de répartition de l'eau des États et des territoires de l'Australie. Les marchés de l'eau sont devenus assez complexes; les exploitants d'infrastructures d'irrigation assurent la gestion de plusieurs fonctions liées aux échanges d'eau (y compris les approbations), tandis que des facilitateurs désignés font la liaison entre les acheteurs et les vendeurs (Anonyme, 2009; Gouvernement australien, 2011b; Grafton *et al.*, 2009; Young, 2008a). Les échanges sur le marché servent aussi à déplacer l'eau des utilisations humaines vers des utilisations visant à répondre aux besoins de l'environnement. À titre d'exemple, dans le bassin Murray-Darling en Australie, le Commonwealth Environmental Water Holder acquiert des droits d'utilisation de l'eau en les rachetant directement auprès des irrigateurs et en réalisant des économies grâce à la modernisation des infrastructures; ces droits sont gérés de façon à accroître les débits des rivières et des terres humides (Gouvernement australien, 2010, 2012).

Des marchés de l'eau existent également au Canada. En Alberta, les utilisateurs d'eau ont accès à la ressource au moyen de permis obtenus en vertu d'un système d'attribution antérieure créé aux termes de la *Water Act* (Alberta Environment, 2003). Dans ce système, les détenteurs de permis de rang supérieur (l'ancienneté étant déterminée par la date d'acquisition du permis) ont le droit d'utiliser la quantité établie avant les détenteurs de permis de rang subalterne. En 1999, un système visant à favoriser des attributions temporaires et des transferts permanents des droits d'utilisation de l'eau a été créé. Les détenteurs de permis peuvent transférer à une autre personne ou société la totalité ou une partie des quantités qui leur sont attribuées. Cependant, ces transferts sont étroitement réglementés. Ils ne sont autorisés que lorsqu'un plan approuvé de gestion de l'eau a été mis en place pour permettre ces transferts ou sur ordonnance du lieutenant-gouverneur en conseil. Le prix exigé pour l'eau transférée est fixé par l'acheteur et le vendeur. Dans le cas des transferts permanents, le gouvernement peut aussi retenir jusqu'à 10 % du droit d'utilisation de l'eau à des fins environnementales (Alberta Environment, 2003).

Comme pour d'autres instruments de politique, certains problèmes et obstacles sont associés aux mécanismes du marché. L'un de ces obstacles est le malaise public que suscite la marchandisation d'une ressource traditionnellement perçue comme un bien commun ou un droit humain (DAES, 2006). Certains doutent de la capacité du marché de répondre à des besoins environnementaux non commerciaux (Bakker, 2007a). Des expériences comme celle du Chili, au cours de la première phase d'activité sur le marché de l'eau, soulèvent des préoccupations légitimes (Bjornlund et McKay, 2002). Un autre défi est lié à la tendance à la concentration de la propriété des droits d'utilisation de l'eau, en particulier là où les prix augmentent dans un contexte de rareté : si les agriculteurs mieux nantis sont en mesure d'acheter la majorité des droits, les plus petits agriculteurs pourraient être écartés du secteur. Cependant, il importe de se rappeler que la réglementation et les mécanismes de participation publique permettent de veiller à ce que les valeurs publiques, ce qui comprend les besoins environnementaux, soient protégées et que les règles soient respectées (Anonyme, 2009; Horbulyk, 2007).

Dans l'ensemble, l'efficacité des échanges d'eau sur un marché dépendra de plusieurs facteurs propres à chaque endroit, par exemple l'infrastructure matérielle, le régime juridique, l'offre et la demande d'eau, et le nombre d'acheteurs et de vendeurs (Rosegrant *et al.*, 2009). Ainsi, en Alberta, la création de marchés de l'eau a été facilitée par la présence de trois conditions préalables importantes : un système d'attribution antérieure qui a créé une hiérarchie parmi les titulaires de droits; l'infrastructure matérielle nécessaire pour déplacer l'eau des vendeurs aux acheteurs et une économie fondée sur l'irrigation qui requiert de grands volumes d'eau. Le comité d'experts

a noté que ces conditions préalables n'existent pas dans d'autres régions du pays, ce qui signifie que la pertinence relative des marchés de l'eau en tant qu'outil pour résoudre le problème de la pénurie d'eau en agriculture est très variable.

### 6.3 TRANSFERT DE CONNAISSANCES ET STRATÉGIES DE MOBILISATION DES PARTIES INTÉRESSÉES

La section 6.2 a examiné un certain nombre d'instruments économiques qui peuvent être employés pour modifier les comportements. Cependant, les raisons qui motivent les comportements individuels en ce qui a trait à l'eau sont complexes et liées aux diverses valeurs que l'eau a pour la société; ces valeurs sont de nature économique et non économique. Ainsi, pour produire un changement de comportement qui contribuera à une gestion durable de l'eau en agriculture, il faudra agir sur différents facteurs qui ont une influence sur les comportements (Lamba *et al.*, 2009). À titre d'exemple, Atari *et al.* (2009) ont constaté que les agriculteurs participant au programme de plan agroenvironnemental de la Nouvelle-Écosse – une importante initiative de gérance mise en place dans toutes les provinces – étaient motivés à y participer beaucoup plus par des considérations non financières que par des considérations financières. Les trois déterminants les plus importants qui sont ressortis de cette étude sont que le programme aidait à diffuser des pratiques de gérance agricole positives, à améliorer les relations avec les voisins non agriculteurs et à respecter la réglementation environnementale appliquée par les gouvernements (Atari *et al.*, 2009).

Des études comme celles-ci soulignent le rôle clé joué par une communication efficace et le transfert de connaissances. Le succès des actions visant à promouvoir la durabilité de l'eau repose sur la participation des intéressés à une solution particulière et sur leur sens des responsabilités dans un contexte particulier (p. ex. au niveau local, régional ou du bassin hydrographique). Avant de tenter de résoudre des problèmes, les opinions et les intérêts de chacun devraient être reconnus afin de les prendre en considération de manière appropriée. Cela peut se faire par divers mécanismes. Dans la présente section, l'accent est mis sur l'apprentissage social : l'acquisition de connaissances, de compétences et d'attitudes en étant en contact avec d'autres personnes (collègues, mentors ou experts) par le biais de l'appartenance à des réseaux sociaux (réels ou virtuels) (Cerf *et al.*, 2000; Reed *et al.*, 2010).

La préoccupation exprimée à l'échelle mondiale au sujet de la conservation de l'environnement s'est accentuée au cours des dernières décennies (Fowler, 2002; Goss et Barry, 1995; Salazar-Ordóñez et Sayadi, 2008). Cette préoccupation s'est traduite par l'adoption de politiques qui ont eu un impact sur la production

agricole (Fowler, 2002; Salazar-Ordóñez et Sayadi, 2008). Un enjeu clé pour les chercheurs et les praticiens est de trouver des façons de rendre la participation du public plus efficace (O'Faircheallaigh, 2010). La mobilisation du public et des parties intéressées peut viser divers objectifs, dont une plus grande transparence des décisions politiques, une plus grande acceptabilité des politiques au sein de la société, la participation des utilisateurs à l'adoption de mesures planifiées, et l'adaptation des politiques aux circonstances locales, naturelles et sociales (Steyaert et Jiggins, 2007). Outre ces objectifs, Stewart et Sinclair (2007) ont dressé une liste des avantages liés à la participation du public : « l'accès au savoir local, une gamme plus étendue de solutions possibles, l'évitement de coûteux litiges, le renforcement de la trame démocratique de la société, l'autonomisation individuelle et communautaire, ainsi que la promotion d'un meilleur apprentissage individuel et social » [traduction] (O'Faircheallaigh, 2010; Stewart et Sinclair, 2007).

Le comité d'experts est d'avis que la mobilisation du public ne se résume pas à diffuser de l'information dans un processus de communication unidirectionnel. Une véritable mobilisation du public à l'égard des questions de gouvernance et de gestion de l'eau suppose une communication dynamique et participative entre les membres du public, les gestionnaires de l'eau et les responsables des politiques. Plusieurs mécanismes de collaboration examinés précédemment s'appuient sur cette hypothèse. Du même coup, l'opinion publique limite les actions que peuvent prendre les gouvernements (et les responsables des politiques) (Owen *et al.*, 2000; Pietsch et McAllister, 2010). Si le public partage l'opinion des experts, la politique mise de l'avant aura probablement des effets importants et étendus à court terme; mais si les membres du public sont sceptiques ou hésitent parce que les changements requis ont des répercussions importantes sur leur vie quotidienne, la politique risque de ne pas être acceptée (Pietsch et McAllister, 2010). C'est pourquoi la transparence et un transfert de savoir réel (par la communication) sont des facteurs clés pour promouvoir l'utilisation durable de l'eau en agriculture et pour éclairer le débat public et les responsables des politiques au sujet de la durabilité de l'agriculture.

La gestion durable de l'eau en agriculture ne peut se faire sans un transfert de connaissances au sujet des bonnes pratiques et stratégies agricoles concourant à un degré élevé de conformité parmi les agriculteurs et les collectivités avoisinantes. Par conséquent, la communication, la diffusion et l'adoption de nouvelles pratiques de gestion sont des domaines d'étude essentiels (Compagnone *et al.*, 2009; Röling et Wagemakers, 2000). Les problèmes et les défis associés à la diffusion et à l'adoption de pratiques et de stratégies novatrices demeurent mal compris au Canada. De façon similaire, la communication a essentiellement été étudiée dans une perspective de « vulgarisation scientifique allant du sommet vers la base ».



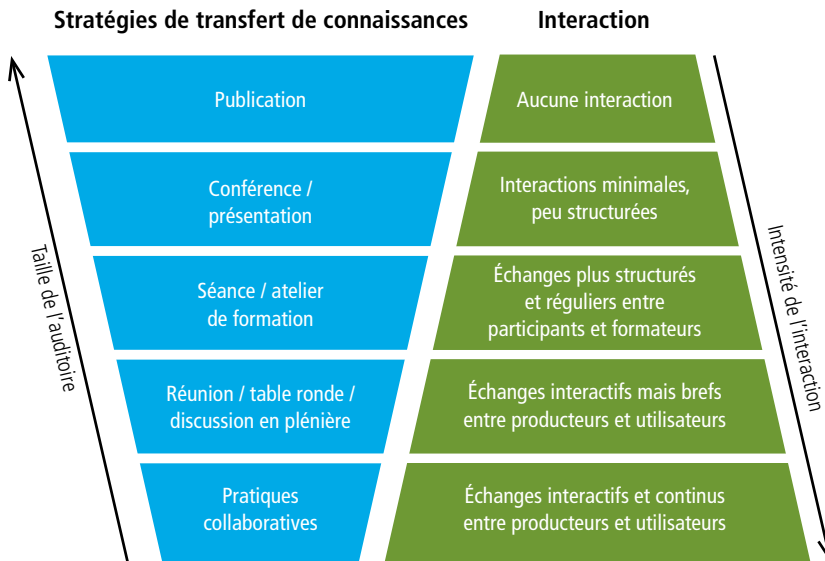
L'approche descendante actuelle en matière de transfert de technologie repose sur l'idée qu'il faut faire appel à quelques utilisateurs potentiels choisis, informés et convaincus pour rejoindre un grand nombre de leurs pairs. Dans bien des cas, cette approche s'est révélée inefficace.

En agriculture, il y a un écart important entre les connaissances disponibles et leur utilisation (Röling, 2009). L'adoption de pratiques, de stratégies et de technologies de gestion de l'eau durables fait intervenir des processus complexes soumis à l'influence d'une multitude de conditions socioéconomiques, politiques et techniques. Une meilleure compréhension de ces conditions est donc requise (Leeuwis et van den Ban, 2003). Des outils, des stratégies et des mécanismes qui peuvent faciliter la diffusion et l'acquisition de connaissances, de pratiques et de technologies nouvelles sont aussi essentielles (Bessette, 2004; TRAME, 2007). Cela est vrai au niveau de la ferme, où les technologies et les pratiques comme celles examinées au chapitre 5 peuvent jouer un rôle important en vue d'évoluer vers une gestion plus durable de l'eau, si elles sont appliquées dans le contexte d'une gouvernance plus efficace (section 6.1). À titre d'exemple, les stratégies visant à permettre au secteur agricole de s'adapter à la variabilité du climat sont bien comprises dans la littérature (Wall et Smit, 2007; de Lœe *et al.*, 2001). Cependant, la mise en œuvre de ces stratégies au Canada varie largement (Dryden-Cripton *et al.*, 2009; Wall et Smit, 2007).

Adapter les techniques de communication de manière à atteindre différents objectifs et à rejoindre divers groupes intéressés peut être problématique. Les stratégies de communication devraient cibler à la fois les principaux auditoires (p. ex. les agriculteurs et leurs familles) et les auditoires intermédiaires influents (comme les leaders d'opinion) (Blackburn, 1994; Swanson *et al.*, 1997; TRAME, 2007). Les outils de communication devraient s'aligner sur les objectifs visés, tandis que les moyens employés (p. ex. les articles populaires, la participation à des symposiums, les outils éducationnels, les communautés de pratique, le recours à des porte-parole du milieu agricole) devraient convenir à l'auditoire visé (p. ex. les agriculteurs, les représentants municipaux, le grand public) afin de maximiser les chances que l'objectif final soit atteint : accroître la sensibilisation ou susciter des changements dans les pratiques agricoles (Bessette, 2004; Brisson *et al.*, 2010).

Il existe de nombreuses stratégies de transfert de connaissances et chacune comporte une intensité d'interaction différente avec l'auditoire visé (voir la figure 6.3). Les stratégies de transfert de connaissances (communication) doivent être adaptées à la nature de l'information à communiquer et aux objectifs à atteindre. Les obstacles et les avantages ont une incidence sur la façon dont les auditoires concernés utiliseront les connaissances qui leur sont transmises (Lemire *et al.*,

2009). Ainsi, il n'y a pas de stratégie unique de transfert du savoir pouvant s'appliquer efficacement dans toutes les circonstances (Lemire *et al.*, 2009). Le reste de la présente section est consacré à un examen de trois approches axées sur le transfert des connaissances qui sont particulièrement pertinentes au secteur agricole : *les stratégies de diffusion*, *les stratégies d'appropriation* et *le travail de vulgarisation*. Ces approches diffèrent principalement au niveau de leurs objectifs, et de la taille et de la nature de l'auditoire visé.



Adapté de Lemire *et al.*, 2009

Figure 6.3

### Interactions requises par différentes stratégies de transfert de connaissances

Cette figure illustre les différentes stratégies de transfert de connaissances par rapport à la taille de l'auditoire rejoint et l'intensité de l'interaction requise par chaque stratégie.

### Stratégies de diffusion

En tant que stratégie de transfert du savoir, la diffusion vise à faire en sorte que diverses parties intéressées aient accès aux nouveaux renseignements et les comprennent (Lemire *et al.*, 2009). Une diffusion efficace requiert des spécialistes capables de présenter l'information à un vaste auditoire dont les membres ont souvent une bonne connaissance du sujet traité (Lemire *et al.*, 2009). Étant donné que cette stratégie vise à communiquer de l'information à un vaste auditoire, elle

n'est pas un outil efficace pour expliquer comment ces connaissances peuvent être appliquées en termes concrets et détaillés (Lemire *et al.*, 2009). Les médias sociaux sont un bon exemple de ce modèle de transfert de savoir (encadré 6.3).

### **Encadré 6.3**

#### **Les médias sociaux comme exemple de stratégie de diffusion**

Afin de maximiser le potentiel de réussite, la communication portant sur des pratiques et des stratégies de gestion durable de l'eau doit mettre à profit les nouvelles technologies d'information et de communication. Internet a facilité la collecte et le partage de renseignements parmi les agriculteurs et entre les agriculteurs et le public, ainsi que la formation de réseaux agricoles (Godfrey et Wood, 2003). Des sites Web tels que FarmIssues.com offrent des renseignements au public au sujet des enjeux agricoles et renferment des liens vers les organisations agricoles pertinentes. L'éducation populaire joue un rôle important dans les perceptions du public et, en définitive, dans l'élaboration des politiques. Les organisations dont le mandat principal est d'informer les agriculteurs et de leur permettre de partager leurs connaissances et leurs expériences (p. ex. Farm and Food Care Ontario) possèdent des sites Web utiles qui servent à diffuser de l'information. Les pages Facebook, les flux Twitter, les blogs et les synthèses de travaux de recherche accessibles en ligne sont quelques-unes des options offertes par les médias numériques qui peuvent être employées dans le cadre d'activités de transfert de connaissances (Elissade *et al.*, 2010). Le niveau d'interaction que permettent les médias sociaux est très variable. Les blogs ont tendance à être « unidirectionnels », bien que certains permettent d'afficher des commentaires. À l'opposé, les pages Facebook peuvent être hautement sociales et mener à la formation de communautés interactives.

### **Stratégies d'appropriation**

L'emploi de stratégies d'appropriation pour transférer des connaissances permet l'intégration et l'application du savoir (Lemire *et al.*, 2009). Ces stratégies nécessitent des services de formation et des spécialistes de diverses disciplines, et elles comportent des échanges multidirectionnels d'information (Lemire *et al.*, 2009). Les auditoires ciblés par les activités de transfert de connaissances au moyen de stratégies d'appropriation sont beaucoup plus restreints que ceux visés par les stratégies de diffusion; de plus, ces stratégies rejoignent un éventail plus diversifié de groupes intéressés. Un exemple de stratégie d'appropriation est la création d'une communauté de pratique (voir l'encadré 6.4). Un objectif primordial des stratégies d'appropriation est habituellement l'apprentissage (ou la résolution d'un problème) en utilisant les connaissances et l'expérience de chaque participant de façon organisée

et bien structurée. Les stratégies d'appropriation permettent généralement une mobilisation plus efficace des participants que les stratégies de diffusion en raison du plus grand degré d'interaction qu'elles permettent (Lemire *et al.*, 2009).

Lorsque des solutions en ligne sont utilisées pour créer des communautés de pratique, il est essentiel que l'auditoire recherché ait accès aux outils nécessaires (ordinateurs, branchement à Internet, etc.) et sache comment utiliser les technologies d'information. Dans le secteur agricole, l'adoption des outils offerts sur Internet dans l'application des connaissances varie beaucoup, certains agriculteurs étant des utilisateurs très expérimentés de ces outils, tandis que d'autres les adoptent plus lentement. Ainsi, dans le secteur agricole, Yiridoe *et al.* (2010) ont constaté que si les stratégies de diffusion des connaissances en ligne gagnent en popularité, elles n'ont pas remplacé les outils de communication utilisés depuis longtemps en milieu rural, dont la communication entre les pairs, les bulletins agricoles, les revues agricoles, les tournées et les démonstrations sur place.

#### **Encadré 6.4**

#### **Les communautés de pratique comme exemple de stratégie d'appropriation**

Les communautés de pratique, en particulier celles appelées communautés de pratique virtuelles (CPV), sont de nouvelles formes d'initiatives de transfert du savoir utilisées de plus en plus fréquemment. Aux fins de cette analyse, une communauté de pratique peut se définir comme « un groupe de personnes liées par une expertise et une passion communes pour une entreprise conjointe qui développent un répertoire commun de ressources (outils) qui les aident à mener leurs activités » [traduction] (tiré de O'Kane *et al.*, 2008; Wenger *et al.*, 2002).

Les communautés de pratique offrent non seulement un forum d'information et de discussion, mais aussi une plateforme interactive d'apprentissage, de résolution de problèmes, de partage d'expériences et d'échange de connaissances entre des gens ayant des intérêts communs (Lave et Wenger, 1991; O'Kane *et al.*, 2008). Le modèle de la communauté de pratique peut être réel ou virtuel, ce dernier nécessitant le recours aux technologies de l'information et des communications. À titre d'exemple, dans un cadre de gestion de l'eau en milieu rural, une CPV pourrait faciliter la mise en commun d'expériences entre les agriculteurs et/ou les collectivités rurales, en dynamisant le partage de renseignements sous forme de cas de réussites et de leçons apprises. Ce genre d'activité de transfert de savoir se déroule habituellement par le

*suite à la page suivante*

biais de courriels, de vidéoconférences, de forums de discussion, etc., qui peuvent tous être documentés et archivés aux fins de consultation ultérieure. Les CPV conviennent plus particulièrement aux milieux ruraux et agricoles parce qu'elles permettent de contourner le problème inhérent à l'éloignement des participants (voir, par exemple, Karetso *et al.*, 2008).

### Le travail de vulgarisation

Le travail de vulgarisation est un outil qui peut servir dans toute une variété de stratégies de transfert du savoir. En agriculture, la vulgarisation englobe un large éventail d'initiatives publiques et privées visant à transférer des connaissances, à éduquer et à mobiliser les producteurs pour qu'ils passent à l'action (Feder *et al.*, 2001). La vulgarisation peut porter sur le transfert de technologies, le transfert de pratiques de gestion pour mobiliser et organiser les agriculteurs et les collectivités rurales, et le renforcement des capacités des agriculteurs et des collectivités rurales (p. ex. en développant les ressources humaines, en augmentant la capacité de recueillir et d'utiliser des données sur le marché ou en perfectionnant les compétences en gestion sur la ferme) (Feder *et al.*, 2001).

Le rôle des vulgarisateurs évolue, passant de « la diffusion traditionnelle de la technologie » à « l'organisation des producteurs agricoles, la création de liens avec les marchés et la liaison avec les autres acteurs du système d'innovation agricole » [traduction] (Rivera et Sulaiman, 2009). L'acceptation des nouvelles technologies parmi les agriculteurs dépend des incitatifs économiques qui leur sont offerts (Tollefson et Wahab, 1996). Le transfert de technologie et la vulgarisation ont un rôle clé à jouer dans cette acceptation. L'efficacité des transferts d'information dépend essentiellement de la présence de vulgarisateurs motivés et bien formés (Tollefson et Wahab, 1996). Les défis auxquels font face les vulgarisateurs sont notamment la capacité de présenter efficacement l'information pour que la clientèle agricole utilise la technologie de manière appropriée (Tollefson et Wahab, 1996). L'encadré 6.5 offre un exemple d'initiative de vulgarisation réussie, élaborée à l'origine dans le Sud de l'Ontario. Les évaluations de ce programme ont mis en relief le rôle critique joué par les vulgarisateurs sur le terrain, en travaillant directement auprès des producteurs agricoles sur la ferme. Un autre exemple pertinent est celui du programme de qualité des eaux rurales de l'Ontario, qui fait ressortir l'importance du renforcement des capacités pour aider les agriculteurs à devenir eux-mêmes des vulgarisateurs au sein de leur collectivité.

### Encadré 6.5

#### Le programme de la qualité des eaux rurales

Dans plusieurs bassins hydrographiques, les activités agricoles sont un important vecteur de nutriments, d'agents pathogènes et d'autres produits nuisibles à la qualité de l'eau. Comme en témoignent les expériences de l'Île-du-Prince-Édouard, le succès des approches réglementaires pour contrer ces menaces a été très inégal (voir l'encadré 4.1). En conséquence, de nombreuses sphères de compétence recourent à des approches axées sur la gérance pour appuyer l'application de PGB dans les exploitations agricoles. Le programme de la qualité des eaux rurales adopté par la municipalité régionale de Waterloo (MRW) en 1998 est un exemple de longue date d'initiative réussie qui a éventuellement été étendue à l'ensemble du bassin hydrographique de la rivière Grand et même au-delà (Simpson *et al.*, 2009). L'objectif de ce programme était de protéger la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface grâce à une collaboration étroite avec les agriculteurs pour sélectionner des PGB appropriées et les mettre en application selon une formule de partage des coûts. La disponibilité de fonds pour partager les coûts de la mise en œuvre des PGB a été un élément déterminant du succès du programme (Dupont, 2010). Cependant, parmi les autres facteurs qui ont manifestement contribué à la réussite du programme, il y a l'approche axée sur les partenariats (entre les organisations agricoles au niveau de la MRW et au niveau local et provincial, les offices de protection de la rivière Grand et les organismes du gouvernement provincial) (Lamba *et al.*, 2009). Le renforcement des capacités des agriculteurs est un résultat observable de ce programme. Éventuellement, une mobilisation des agriculteurs pour les amener à jouer un rôle de chef de file et de motivateur s'est avérée essentielle (Simpson *et al.*, 2009).

## 6.4 L'EMPLOI D'OUTILS EFFICACES DE GOUVERNANCE ET D'ÉLABORATION DES POLITIQUES À L'APPUI D'UNE GESTION DURABLE DE L'EAU EN AGRICULTURE

La combinaison de stratégies de gouvernance, d'instruments économiques, de percées technologiques et de stratégies de transfert des connaissances peut contribuer à promouvoir une gestion durable de l'eau en agriculture. Le principal facteur de réussite est de trouver la bonne combinaison d'instruments de politique convenant au contexte et de communiquer efficacement l'objet de ces instruments de façon à garantir l'adoption des comportements souhaités. Tel qu'indiqué précédemment, aucune stratégie unique ne peut convenir à toutes les situations étant donné que les objectifs et les auditoires peuvent varier. La meilleure approche pour

le transfert de connaissances est une combinaison de stratégies visant à rejoindre chaque auditoire cible d'une manière efficace et accessible (Fondation de la faune du Québec et Union des producteurs agricoles, 2011; Lemire *et al.*, 2009).

Au terme de ses recherches et de ses délibérations, le comité d'experts est arrivé à la conclusion qu'une saine gouvernance, l'utilisation efficace d'instruments économiques appropriés et des stratégies efficaces de transfert de connaissances sont des conditions préalables essentielles à une gestion durable de l'eau en agriculture. À titre d'exemple, les expériences observées au Canada et ailleurs dans le monde démontrent de façon concluante que même si des PGB sont connues et que des technologies efficaces sont disponibles, la mesure dans laquelle ces pratiques seront adoptées dépend d'une foule de considérations, notamment le cadre de réglementation, la présence de mesures incitatives appropriées, l'accès aux connaissances et la capacité d'appliquer ces pratiques et ces technologies. Dans la même veine, bien que les connaissances sur les stratégies d'adaptation requises pour composer efficacement avec le changement climatique dans le secteur agricole soient relativement bonnes et progressent constamment dans la littérature, les principales contraintes à leur adoption découlent de considérations semblables à celles qui ont été examinées dans le présent chapitre.

### Points saillants du chapitre

- La gouvernance de l'eau au Canada est beaucoup plus complexe aujourd'hui qu'elle ne l'était pour les générations précédentes. Par conséquent, toute une série de défis nouveaux se posent sur les plans de l'efficacité, de la capacité, de la légitimité et de l'obligation redditionnelle. Étant donné la compréhension inégale de la meilleure façon d'affronter ces défis, cette problématique représente un important domaine de recherche future.
- Même si aucun cadre unique « uniformisé » ne saurait convenir à toutes les sphères de compétences (en raison des différences entre les régimes juridiques, les structures institutionnelles et les contextes socio-économiques), le comité d'experts est d'avis que plusieurs principes ont démontré leur efficacité pour appuyer une gestion durable des ressources hydriques utilisées en agriculture et à d'autres fins humaines et environnementales. Ces principes englobent les suivants :
  - o S'assurer que la gouvernance s'effectue à l'échelle appropriée.
  - o Intégrer la planification de l'utilisation des terres aux décisions relatives à la gestion de l'eau.
  - o Associer les parties intéressées au processus décisionnel.
  - o Intégrer les connaissances au processus décisionnel.

*suite à la page suivante*

- Des instruments économiques conçus et mis en œuvre de façon appropriée peuvent aussi concourir à une gestion durable de l'eau. Entre autres exemples, il y a les techniques d'évaluation économique, les incitatifs économiques, les prix et les marchés de l'eau.
- Les stratégies de transfert des connaissances sont un autre moyen clé d'influencer les comportements. Une stratégie unique ne peut convenir à toutes les situations parce que les objectifs et les auditoires varient. Une meilleure compréhension des méthodes les plus efficaces pour communiquer de l'information sur l'utilisation durable de l'eau est requise afin de s'assurer que la documentation pertinente parvienne aux auditoires visés de manière efficiente et accessible.



# 7

## Conclusion

- Question principale
- Sous-questions
- Réflexions finales

## 7 Conclusion

L'eau est essentielle aux activités humaines et aux écosystèmes naturels. Elle est aussi une ressource de plus en plus rare. La croissance démographique et l'augmentation des revenus accentue la concurrence pour l'eau et d'autres ressources, tout comme les incertitudes liées au changement climatique rendent encore plus complexe la tâche de veiller à ce que les ressources soient utilisées de façon efficiente et que les risques pour l'infrastructure et la production soient gérés efficacement. Améliorer – ou simplement maintenir – les niveaux de vie, la qualité de vie et la santé dans le monde au cours des prochaines décennies dépendra de notre capacité d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de préserver la qualité de l'eau. En outre, il est clair qu'une approche axée sur le statu quo ne suffira pas. Il est nécessaire d'adopter une approche intégrée et concertée qui réduira les effets sur la qualité de l'eau dans tous les domaines, en optimisant l'utilisation des terres, de l'eau et des autres ressources dans l'ensemble des secteurs économiques et des écosystèmes régionaux, et au-delà des frontières politiques<sup>38</sup>.

L'agriculture a un rôle important à jouer en vue de relever ces défis d'envergure mondiale puisque la production agricole peut avoir des répercussions profondes sur la disponibilité et la qualité des ressources hydriques. Deux aspects distincts de l'utilisation de l'eau en agriculture doivent être soulignés. Environ 70 à 80 % de la superficie en culture dans le monde (de Fraiture et Wichelns, 2010; Molden *et al.*, 2007b) et plus de 97 % de la superficie cultivée au Canada (AAC, 2011c) sont alimentées par les précipitations sous forme de pluie et de neige. En agriculture non irriguée, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des rendements des récoltes peut hausser la productivité à l'acre, augmentant du même coup la production totale sans qu'une expansion de la superficie cultivée soit nécessaire. Dans un monde où il y a une concurrence de plus en plus vive pour la terre, l'eau et les autres ressources, cela pourrait constituer une importante contribution sur le plan de la durabilité. D'autres activités agricoles, par exemple l'irrigation et l'usage de l'eau dans les activités d'élevage intensives, puisent dans les rivières, les lacs, les réservoirs et les nappes d'eaux souterraines. Pour ces utilisations et plus particulièrement en agriculture irriguée – qui accapare la plus grande partie de la consommation d'eau en agriculture – des améliorations de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pourraient aussi faire une contribution importante

---

38 De nombreux rapports et articles ont été publiés sur la nature de ce contexte mondial. Le présent paragraphe est inspiré de Godfray *et al.*, 2010; Banque mondiale, 2010; et UNESCO, 2012.

à la productivité agricole et à la disponibilité des ressources hydriques, notamment dans les régions exposées à un stress hydrique où l'extraction de l'eau à des fins d'irrigation rivalise avec d'autres utilisations<sup>39</sup>.

Dans toutes les formes d'agriculture, y compris l'agriculture alimentée par les précipitations, l'agriculture irriguée, l'élevage intensif et d'autres activités, des progrès peuvent également être réalisés en vue d'atténuer l'impact sur la qualité de l'eau des nutriments, des pesticides et des autres facteurs de risque environnementaux liés à la production agricole, dont les coûts peuvent être élevés. À titre d'exemple, une évaluation de l'azote effectuée en Europe en 2011 (Sutton *et al.*, 2011) a estimé que les dommages environnementaux dans l'Union européenne causés par l'azote réactif provenant de l'agriculture atteignaient entre 20 et 150 milliards d'euros annuellement. Ce chiffre doit être comparé à des avantages pour les agriculteurs tirés de l'utilisation d'engrais azotés d'une valeur se situant entre 10 et 100 milliards d'euros par année. Bien que l'utilisation de fumiers et d'engrais au Canada soit moins intensive que dans l'UE, de sérieuses questions se posent à l'échelle locale et régionale. L'impact de l'agriculture sur la qualité de l'eau est une problématique complexe qui requiert une évaluation scientifique minutieuse afin de déterminer les effets, les coûts et les avantages de diverses stratégies d'atténuation, ainsi que les arbitrages connexes.

Des possibilités économiques considérables s'offriront au secteur agricole canadien avec l'augmentation future de la demande mondiale pour les aliments et les autres produits de l'agriculture. Le comité d'experts note que le Canada possède l'étendue territoriale, le capital financier, la technologie et l'expertise pour faire un apport significatif en vue de répondre à cette demande. Cependant, toute une série de questions se posent en lien avec la gestion des terres et de l'eau, la politique et la réglementation publiques, les perceptions sociales et d'autres aspects qui nécessiteront une gestion efficace afin de maximiser ce potentiel et d'assurer la durabilité – et, en fait, la viabilité – de ce secteur. Le présent rapport décrit plusieurs stratégies de gestion et investissements en recherche qui pourraient concourir à l'atteinte de ces buts.

Le tableau 7.1 présente un aperçu des principaux problèmes qui pourraient toucher la gestion durable de l'eau à des fins agricoles et les risques/incertitudes connexes, en plus des stratégies de gestion potentielles et des investissements qui pourraient être faits dans les sciences et le savoir pour appuyer chacune de ces stratégies. Le reste du chapitre présente les réponses du comité d'experts à la question

---

39 Pour une analyse plus complète des contributions relatives de l'agriculture alimentée par les précipitations et de l'agriculture irriguée, voir l'encadré 2.1 au chapitre 2 du présent rapport.

principale et aux sous-questions posées par le commanditaire qui, ensemble, contribuent à mieux articuler les besoins scientifiques et les connaissances requises pour guider la gestion durable de l'eau en agriculture. Tel que noté à diverses reprises dans le rapport, la combinaison précise d'enjeux, de risques, d'incertitudes, de stratégies et de besoins de recherche diffère quelque peu d'un sous-secteur agricole et d'un endroit à l'autre. Par conséquent, il n'a pas été possible de dresser un bilan global par secteur et par région dans les limites du présent rapport. Néanmoins, le tableau qui suit donne un aperçu des principaux enjeux de portée générale, à la lumière des renseignements actuellement disponibles. Entreprendre des recherches approfondies sur la meilleure façon de répondre à ces enjeux globaux dans chaque sous-secteur et région devrait représenter une priorité élevée.

**Tableau 7.1**

**Stratégies de gestion et investissements en recherche pour promouvoir une gestion durable de l'eau en agriculture au Canada**

Enjeux	Risques/ incertitudes	Stratégies de gestion	Investissements en recherche
Conditions du marché	Occasions ratées en raison d'un manque de ressources, des perceptions du public, de pénuries de compétences, de lacunes dans les connaissances sur l'évolution du marché ou d'autres facteurs	Investir dans la recherche afin de mieux comprendre et atténuer les risques environnementaux, sociaux, économiques et informationnels pour l'expansion des marchés	Recherche économique et politique sur les tendances des marchés en agriculture  Définition des besoins en ressources humaines et en développement des compétences
Gestion des ressources hydriques/terrestres	Occasions ratées de capitaliser sur la demande croissante dans le monde pour les aliments et les autres produits agricoles (p. ex. les biocarburants, les produits bio-industriels) à cause d'une gestion inefficace des ressources limitées en eau et en terres  Impact potentiellement négatif des cultures sur l'environnement aquatique	Améliorer la gestion durable des terres, de l'eau et des autres ressources; adopter une gestion adaptative afin de pouvoir élaborer des stratégies robustes tenant compte de l'avenir incertain des ressources en eau	Surveillance et modélisation efficaces afin d'améliorer la gestion opérationnelle, d'acquiescer une meilleure compréhension du patrimoine de ressources et des changements potentiels futurs, et d'évaluer les investissements dans les PGB, la gouvernance et la technologie  Recherche visant à obtenir une meilleure compréhension des liens complexes entre l'utilisation des terres, la gestion de l'eau, les flux environnementaux et la santé des écosystèmes

*suite à la page suivante*

Enjeux	Risques/ incertitudes	Stratégies de gestion	Investissements en recherche
Risques au niveau des politiques et de la réglementation pour l'accès à l'eau aux fins de la production agricole	Accès à la technologie et investissements dans les pratiques de gestion touchées par les éléments d'incertitude et/ou les changements imprévus dans le cadre réglementaire	Travailler en vue d'améliorer la clarté et la stabilité du cadre réglementaire  Améliorer la durabilité de la production agricole afin de réduire le risque de modifications soudaines à la réglementation	Recherche sur les meilleures pratiques de gouvernance afin d'intégrer les préoccupations des parties intéressées et de renforcer le soutien du public  Recherche sur les PGB, les instruments de politique et les options technologiques en vue d'améliorer la durabilité
Perceptions sociales au sujet de l'utilisation de l'eau en agriculture	Possibilité que des perceptions négatives au sujet de l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture ne restreignent l'approbation sociale d'une expansion de la production, limitant ainsi la capacité d'exploiter des possibilités d'expansion  Risques perçus liés à l'impact de l'agriculture sur l'environnement aquatique	Améliorer la communication au sujet des gains d'efficacité dans l'utilisation de l'eau et les réductions des effets de la production agricole sur l'environnement  Mobiliser les parties intéressées et contribuer à éclairer le débat entourant les décisions relatives à la gestion de l'eau	Surveillance efficace afin d'acquérir une meilleure compréhension du patrimoine de ressources et des changements potentiels futurs, et d'évaluer les investissements dans les PGB, la gouvernance et la technologie  Recherche visant à améliorer le transfert des connaissances et l'échange de renseignements entre les parties intéressées
Gouvernance et prise de décision axée sur la gestion de l'eau	Complexité accrue de la gouvernance de l'eau  Émergence de nouvelles façons de gérer la ressource qui pourraient poser de nouveaux défis  Manque de coordination et d'intégration susceptible de nuire à l'efficacité de la gouvernance	Intégrer des principes de gouvernance efficace et des instruments de politique appropriés pour appuyer une prise de décision éclairée dans la gestion de l'eau  Déterminer les possibilités de coordination entre les sphères de compétence à l'échelle régionale et nationale au bénéfice de toutes les parties	Recherche sur les meilleures pratiques pour relever les défis actuels et émergents sur le plan de la gouvernance et pour faciliter la coordination et l'intégration de la prise de décision dans la gestion de l'eau

suite à la page suivante

Enjeux	Risques/ incertitudes	Stratégies de gestion	Investissements en recherche
Changement climatique (Canada)	Incertitudes accrues attribuables aux changements de température et de taux de CO <sub>2</sub> , fréquence accrue d'événements climatiques extrêmes, changements dans le moment et l'étendue des précipitations, et changements dans les flux d'eau dans l'environnement	Explorer le potentiel d'allongement de la saison de croissance et d'expansion des zones de production, ainsi que les changements au niveau de la viabilité de types particuliers de cultures en un endroit donné (p. ex. à cause des changements dans les précipitations, des variations de température)  Renforcer la résilience et l'adaptabilité par une combinaison de technologies et de pratiques de gestion, menant à un système agricole plus robuste	Recherche sur les effets du changement climatique et l'adaptation à l'échelle régionale afin de mieux éclairer les décisions d'investissement prises par les producteurs agricoles, les gouvernements, l'industrie et les autres parties intéressées

## 7.1 QUESTION PRINCIPALE

Quelles études scientifiques supplémentaires sont nécessaires pour mieux encadrer la gestion durable de l'eau, afin de répondre aux besoins de l'industrie agricole?

Le comité a cerné plusieurs domaines où des connaissances scientifiques supplémentaires – définies largement de manière à inclure les sciences naturelles, les sciences sociales et les sciences de la santé, ainsi que le génie et les sciences humaines – pourraient contribuer à guider la gestion durable de l'eau afin de répondre aux besoins de l'agriculture.

Voici ces domaines prioritaires :

- Parvenir à une meilleure compréhension des risques et des incertitudes entourant des questions telles que les conditions du marché, la concurrence pour les terres et les ressources hydriques et le changement climatique afin d'éclairer les décisions de gestion, et d'aboutir à des pratiques de gestion plus efficaces et à de meilleurs résultats (examiné au chapitre 2).

- Améliorer les données de surveillance sur les aspects plus préoccupants en adoptant une approche axée sur le risque, et renforcer la capacité d'interprétation scientifique de ces données, pour favoriser une meilleure compréhension du patrimoine des ressources hydriques du Canada et des changements qui se produisent sur les plans de l'hydrologie, de la qualité de l'eau, de l'écologie et du climat et pour faciliter une gestion adaptative (examiné au chapitre 3).
- Parvenir à une meilleure compréhension des interactions complexes entre la gestion des terres et les ressources hydriques, y compris l'évaluation de l'efficacité économique et environnementale des PGB et du potentiel de l'agriculture de conservation et d'une approche axée sur les services écosystémiques dans la gestion des ressources naturelles (y compris l'eau et les terres) (examiné au chapitre 4).
- Améliorer les connaissances au sujet des technologies prometteuses au niveau de l'exploitation agricole et des priorités de la recherche, pour contribuer à une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'eau, à une réduction des effets sur l'environnement et à la prise de décisions d'investissement judicieuses par les gouvernements, l'industrie et les producteurs agricoles (examiné au chapitre 5).
- Mettre en place les fondements de la durabilité en adoptant des structures de gouvernance, des techniques d'évaluation, des stratégies de transfert du savoir et des incitatifs économiques appropriés pour favoriser de meilleures décisions de gestion, appuyer l'adoption de pratiques durables et permettre aux collectivités agricoles de forger des rapports de travail étroits avec les autres secteurs et intervenants en vue de résoudre des problèmes intersectoriels (examiné au chapitre 6).

Dans chacun de ces domaines, il n'y a pas de solution unique pouvant s'appliquer efficacement dans toutes les sphères de compétences parce que les conditions économiques, politiques, environnementales, réglementaires et sociales varient considérablement d'un endroit à l'autre. Par conséquent, tout au long du rapport, le comité d'experts a cherché à présenter une gamme d'options à partir desquelles les différents acteurs pourraient faire des choix en fonction de leurs responsabilités et de leurs besoins respectifs. Les réponses aux sous-questions qui suivent traitent de ces questions plus en détail.

## 7.2 SOUS-QUESTIONS

### Sous-question 1

Quel est l'état des ressources hydriques au Canada en vue de leur utilisation à des fins agricoles et quel rôle jouent à cet égard les principales sources de demande concurrentes en milieu rural, comme la consommation de l'industrie locale et l'utilisation à des fins récréatives?

### L'état actuel des ressources hydriques

L'utilisation de l'eau en agriculture comporte deux volets distincts. La principale utilisation des terres agricoles (> 97 %) correspond aux terres arables alimentées par les précipitations (AAC, 2011c) ce qui, au Canada, veut dire l'agriculture alimentée par l'eau tombant sous forme de pluie et de neige. La production agricole a évolué et continue d'évoluer mais, en milieu rural, si l'on tient compte des effets connexes sur la qualité de l'eau et la quantité d'eau, l'utilisation des précipitations naturelles à des fins agricoles n'entre généralement pas en concurrence avec d'autres formes d'utilisation. Cependant, d'autres formes d'utilisation agricole de l'eau, comme l'irrigation et l'élevage, représentent des prélèvements dans les rivières, les lacs, les réservoirs ou les nappes d'eaux souterraines, et elles peuvent entrer en concurrence avec d'autres utilisations de l'eau, notamment l'approvisionnement des municipalités et de l'industrie, la production d'énergie (tant la production hydroélectrique que le refroidissement des centrales thermiques) et les flux environnementaux requis pour préserver les terres humides et les habitats riverains et aquatiques.

En dépit d'une grande disponibilité d'eau douce par habitant, le Canada n'est pas « riche en ressources hydriques ». La majorité des rivières du Canada s'écoulent vers le nord, loin des grandes agglomérations urbaines et de l'industrie agricole (Corkal et Adkins, 2008; Statistique Canada, 2010a). Il y a de nombreuses régions au pays où les pressions sur les ressources hydriques suscitent déjà de sérieuses inquiétudes. De grands secteurs des Prairies, les vallées intérieures de la Colombie-Britannique et certaines parties du Sud-Ouest de l'Ontario ont un climat qui varie de semi-aride à sous-humide et ne reçoivent pas suffisamment de précipitations pour soutenir les cultures de façon régulière (voir le chapitre 3). Ce sont des régions où l'irrigation est bénéfique, mais les pressions sur les ressources hydriques augmentent et, dans certains secteurs de développement intensif de l'irrigation (comme dans le Sud de l'Alberta), les ressources hydriques sont déjà pleinement attribuées. Outre la quantité d'eau, la qualité de l'eau soulève des



préoccupations dans plusieurs sphères de compétence à cause de la contamination provenant des activités humaines, y compris l'agriculture (voir les chapitres 3 et 4). Bien que la pollution soit souvent attribuable à des sources multiples, les facteurs préoccupants dans le cas de l'agriculture englobent les nutriments provenant des engrais et du fumier, les agents pathogènes présents dans les déchets des fermes d'élevage, les médicaments vétérinaires et les pesticides. Ainsi, comme il est expliqué au chapitre 3, les risques de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines par les nutriments suscitent une inquiétude particulière et ils ont augmenté progressivement dans les bassins hydrographiques de toutes les régions agricoles au Canada au cours des dernières décennies. De plus, même si les concentrations sont généralement inférieures aux valeurs limites canadiennes là où il en existe, des résidus de pesticides ont été détectés dans les eaux de surface de toutes les provinces et dans 2 à 40 % de tous les puits analysés en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan, en Ontario, en Nouvelle-Écosse et à l'Île-du-Prince-Édouard (Cessna *et al.*, 2010). Étant donné que l'agriculture a besoin d'avoir accès à des quantités suffisantes d'eau douce de bonne qualité, tant la disponibilité de l'eau que sa contamination suscitent des inquiétudes. Les pressions qui s'exercent au niveau de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau peuvent être imputables à toute une série de facteurs qui varient selon le lieu et la période; mais comme ces pressions vont en s'accroissant, l'agriculture doit évoluer vers une gestion plus durable de l'utilisation et de la consommation de l'eau.

Dans l'ensemble, le Canada ne dispose pas des renseignements requis pour dresser un tableau complet de l'état de ses ressources hydriques, et les données qui existent sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau dans plusieurs régions sont insuffisantes. Il est essentiel de recueillir des données partout au pays pour plusieurs raisons. Un bilan national complet de l'état des ressources hydriques sur les plans quantitatif et qualitatif est requis parce que d'importantes variations climatiques, écologiques, industrielles et démographiques contribuent à rendre la situation unique dans chaque région. Des données temporelles sont nécessaires pour déterminer comment évoluent la quantité d'eau et la qualité de l'eau et pour surveiller l'efficacité des nouvelles mesures de politique. Une bonne partie de l'effort national de surveillance porte sur les grands cours d'eau, mais nous avons aussi besoin de renseignements sur les petits bassins hydrographiques dans les régions agricoles afin de surveiller l'impact de l'agriculture sur l'environnement, y compris le rôle des PGB; parallèlement, des données de recherche détaillées sont requises pour certains endroits en particulier afin de produire les connaissances et les outils de gestion requis pour guider les politiques. Enfin, il est nécessaire d'avoir un large éventail de données pour la gestion opérationnelle des systèmes de ressources hydriques et pour prédire les débits des rivières et les besoins en eau du secteur agricole. La nécessité d'exercer une meilleure surveillance de l'eau

est abordée plus en détail dans les réponses du comité d'experts aux sous-questions 2 et 4, et en rapport avec le besoin connexe de disposer d'outils de modélisation et de prévision.

### **La concurrence entre les utilisateurs d'eau et l'environnement**

L'activité agricole ne représente que 8 % des prélèvements d'eau au Canada, venant après la production d'énergie dans les centrales thermiques, la fabrication et les utilisations municipales. La majorité des prélèvements d'eau des secteurs non-agricoles est de nature non consommatrice, c'est-à-dire que la plus grande partie de l'eau utilisée est retournée à sa source. Globalement, l'activité agricole consomme beaucoup plus d'eau que tout autre utilisateur (66 %) et la plus grande partie sert à l'irrigation (voir le chapitre 2). Il y a actuellement environ un demi-million d'hectares de terres cultivées irriguées au Canada, dont la vaste majorité est située en Alberta et en Colombie-Britannique (Statistique Canada, 2011b). Puisque l'irrigation confère une résistance à la sécheresse, cette activité pourrait devenir beaucoup plus importante dans l'avenir alors que la variabilité climatique augmente; cependant, dans plusieurs régions où l'on retrouve déjà d'importantes superficies de terres cultivées irriguées, il y a une concurrence croissante avec d'autres formes d'utilisation. Dans certains cas, il arrive que l'irrigation soit sacrifiée lorsque des utilisations essentielles sont menacées. Ainsi, en 2009, l'eau disponible pour l'agriculture a été soumise à des restrictions le long de la rivière Nicola, en Colombie-Britannique, afin que le saumon ait suffisamment d'eau pour se reproduire (Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique, 2009).

Tous les utilisateurs d'eau, y compris l'agriculture, sont en concurrence avec l'environnement pour les ressources hydriques (voir les chapitres 2 et 3). Il importe de maintenir la santé des cours d'eau, définie comme étant « la qualité, la quantité et le moment où se produisent les écoulements d'eau requis pour maintenir les composantes, les fonctions, les processus et la résilience des écosystèmes aquatiques qui procurent des biens et des services aux gens » [traduction] (Hirji et Davis, 2009). L'eau qui s'écoule fournit des services écosystémiques utiles, par exemple l'eau que consomment les humains et les animaux, le soutien des écosystèmes aquatiques et terrestres, la protection contre les inondations, les voies de navigation, les commodités et les activités récréatives, ainsi que la dilution et l'élimination des déchets (Hirji et Davis, 2009). Il y a un stress hydrique lorsque la demande d'eau dépasse les limites requises pour maintenir un environnement sain; à l'heure actuelle, certaines régions du pays (p. ex. les Prairies et certaines parties de la Colombie-Britannique) subissent déjà un stress hydrique grave (TRNEE, 2010a). Un rapport du Fonds mondial pour la nature publié en 2009 décrit la rivière Saskatchewan, qui abrite une bonne partie de la production agricole du Canada, comme étant la plus menacée au pays dans l'optique des flux environnementaux.

### La situation future des ressources hydriques

Brosser un tableau plus précis de la situation future de l'eau, sur une échelle temporelle et spatiale est essentiel pour mieux comprendre et gérer les risques futurs et capitaliser sur les possibilités émergentes qui s'offrent au secteur agricole. Cependant, il y a de sérieuses incertitudes liées à la disponibilité future de l'eau pour l'agriculture et à la demande future. Le changement climatique engendre un degré élevé d'incertitude, mais le climat plus doux s'accompagne déjà de changements dans les températures et les précipitations et, partant, dans les conditions de croissance des plantes en agriculture non irriguée; en outre, les changements dans les profils d'accumulation et de fonte de la neige dans les Rocheuses modifient les débits des rivières qui alimentent la plus grande partie des zones d'agriculture irriguée du Canada. Il est prévu que le réchauffement climatique changera les conditions de croissance moyennes et extrêmes (un aspect examiné au chapitre 2). Des recherches récentes ont fait ressortir un risque accru de sécheresse dans les Prairies, mais on s'attend aussi à ce qu'il y ait un risque accru d'inondation qui influera sur les conditions de croissance et la gestion des eaux agricoles (chapitres 2 et 4). La demande d'eau devrait aussi augmenter sous l'effet de l'expansion économique, de la croissance démographique, d'une plus grande demande pour les aliments nécessitant beaucoup d'eau et d'autres facteurs. On prévoit également que le stress hydrique s'accroîtra, alors que la demande croissante engendrera une concurrence plus forte avec l'environnement (un aspect examiné dans les chapitres 2 à 4). La concurrence entre les utilisateurs pour les ressources hydriques devrait aussi augmenter dans plusieurs régions du pays (voir le chapitre 3). Des détails supplémentaires sur les défis associés à la prévision de l'état futur des ressources hydriques sont présentés dans la réponse du comité d'experts à la sous-question 2.

#### Sous-question 2

Que devons-nous savoir de plus au sujet du cycle de l'eau et de l'utilisation de l'eau afin de comprendre le niveau adéquat et la valeur des approvisionnements en eau dans les régions rurales?

Au fil de ses délibérations et de ses recherches, le comité a constaté que les connaissances, les données et les analyses sur le cycle de l'eau et l'utilisation de l'eau au Canada sont limitées dans un certain nombre de domaines clés. Ces lacunes limitent la capacité des responsables des politiques et des autres acteurs d'acquérir une bonne compréhension du niveau adéquat et de la valeur des approvisionnements en eau, ce qui se reflète sur leur capacité d'orienter la gestion durable de l'eau à des fins agricoles. Certains domaines de recherche prioritaires qui permettraient de combler ces lacunes sont présentés ci-dessous.

### **Acquérir une meilleure base de connaissances sur l'état des ressources hydriques**

Tel qu'expliqué dans la réponse du comité d'experts à la sous-question 1, le Canada n'a pas suffisamment d'information sur l'état actuel des ressources hydriques (notamment des renseignements sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau). Il est donc difficile de comprendre l'impact de l'agriculture et des autres secteurs, la nature des changements qui se produisent dans l'environnement, ainsi que les coûts et avantages relatifs de diverses décisions liées à la gestion de l'eau et de différentes pratiques de gestion, innovations technologiques et stratégies de gouvernance.

Chaque bassin hydrographique et chaque région agricole possède des caractéristiques distinctes. Ils se différencient sur les plans de l'hydrologie, du climat, des sols et de la production agricole – des facteurs qui ont tous une influence sur la nature des ressources hydriques, les possibilités de production agricole et les stratégies de gestion optimales. En outre, de nombreux changements environnementaux se produisent à des échelles temporelles différentes. Certains changements, comme les fluctuations des niveaux de pollution dans les rivières, peuvent se produire à une fréquence horaire; d'autres, comme la migration de la contamination par les nutriments dans les sources d'eaux souterraines, peuvent s'étendre sur des décennies. Pour ces raisons, des connaissances et des données temporelles pertinentes à l'échelle locale sont requises en vue de permettre l'élaboration et la mise en œuvre d'approches efficaces et efficientes pour assurer une gestion durable de la ressource. En outre, des données sont nécessaires pour la gestion opérationnelle des systèmes de ressources hydriques et la prévision des besoins en eau de l'agriculture sur différentes échelles temporelles. Tel qu'indiqué dans la réponse du comité d'experts à la sous-question 4, une augmentation des ressources consacrées à la surveillance et à la modélisation connexe pourrait faire partie de la solution.

### **Évaluer les risques et les incertitudes qui planent sur la disponibilité et la qualité futures de l'eau**

La disponibilité, l'utilisation et la qualité futures de l'eau seront façonnées par de nombreux facteurs tels que la demande accrue pour les aliments et les autres produits agricoles (p. ex. les biocarburants et les produits bioindustriels), la concurrence provenant des utilisations non agricoles de l'eau (p. ex. l'industrie, les municipalités, la production hydroélectrique), l'impact du changement climatique et la variabilité du climat, et d'autres. Pour faciliter la gestion durable de la ressource, il est nécessaire d'acquérir une meilleure compréhension de ces risques et incertitudes, et de leurs effets sur les divers bassins hydrographiques et régions agricoles.

Une meilleure connaissance de la demande du marché, de la situation future de l'eau et des utilisations concurrentes pourrait être acquise grâce à des recherches socio-économiques, des exercices de prévision et des analyses de scénarios. Dans des pays comme le Royaume-Uni et l'Australie, des recherches ciblées dans ces domaines aident à éclairer l'élaboration des politiques et la prise de décision au niveau du gouvernement, de l'industrie et des autres parties intéressées. Le Canada pourrait investir davantage dans ces formes de recherche, de collaboration et d'analyse. Face à une incertitude élevée au sujet de la situation future de l'eau, y compris les effets incertains du changement climatique, des approches nouvelles s'imposent pour évoluer vers une gestion adaptative, en privilégiant des stratégies robustes plutôt qu'optimales (Lempert et Schlesinger, 2000).

Pour comprendre l'impact de facteurs tels que la variabilité et le changement climatiques, il faudrait posséder des connaissances, des renseignements et des analyses supplémentaires au sujet des changements qui se produisent à l'échelle mondiale, des conditions locales et de leurs interactions. Cette problématique est particulièrement complexe dans le cas du Canada, où un réchauffement du climat a déjà modifié l'accumulation et la fonte de la neige, ce qui a une incidence sur les débits des rivières et la gestion des terres agricoles. La perspective d'inondations et de périodes de sécheresse plus fréquentes suscite des préoccupations particulières (Bonsal *et al.*, 2012). Les inondations et les périodes de sécheresse durant plusieurs années sont devenues une caractéristique récurrente dans les données d'observation sur les Prairies au 20<sup>e</sup> siècle, avec les coûts économiques élevés qui en découlent (Wheaton, 2011). Pourtant, des périodes de sécheresse plus longues ont été observées dans les paléodonnées. Même si l'agriculture canadienne s'est adaptée avec succès à la variabilité climatique extrême, un effort d'adaptation supplémentaire sera probablement nécessaire, parallèlement à un nouvel examen du rôle de l'agriculture en vue d'en atténuer les effets les plus importants. Cela pourrait englober, par exemple, le rôle du drainage agricole et de la conservation des terres humides pour renforcer la résilience à la sécheresse et réduire les risques de crues en aval, ainsi que le rôle potentiel des terres agricoles en tant que plaines inondables pour le stockage de l'eau lors d'événements extrêmes. Afin d'exploiter ces possibilités, il faudra réaliser des projets pilotes sur des sites expérimentaux dans des sous-bassins hydrographiques où il est possible d'étudier ces questions en milieu naturel et à une échelle intégrée. D'autres questions importantes pour la recherche sont notamment l'influence de la variabilité climatique sur la demande potentielle d'irrigation et de drainage, sur les charges en nutriments et leurs effets sur les écosystèmes aquatiques et la qualité de l'eau potable, et sur le bilan et la fréquence des espèces pathogènes dans les eaux souterraines (voir le chapitre 3 pour un examen plus détaillé de ces besoins de recherche et d'autres portant sur les éléments de risque et d'incertitude). De toute évidence, des progrès

au niveau de la science climatologique à l'échelle nationale et internationale axés sur la réduction de l'incertitude des scénarios climatiques et l'amélioration des prévisions à court, à moyen et à long termes, seraient très utiles.

### **Gérer l'interface de l'agriculture avec l'environnement aquatique**

Dans certaines des économies les plus avancées, l'importance et la complexité des interactions de l'agriculture avec l'environnement aquatique sont de plus en plus reconnues. La question des charges en nutriments dans l'environnement est un exemple des facteurs qui interviennent dans ce cas. Aux États-Unis, l'EPA a souligné que la création anthropogénique d'azote réactif comportait des avantages essentiels pour les humains – notamment en vue de répondre aux besoins alimentaires. L'organisme précise aussi que l'agriculture utilise de l'azote réactif et qu'elle est responsable d'une plus grande quantité des pertes d'azote réactif dans l'environnement que tout autre secteur économique. En fait, selon les calculs de l'EPA pour la seule baie de Chesapeake, « ...les ajouts directs à l'environnement provenant de l'agriculture sont d'environ 370 000 tonnes d'azote réactif par année, causant des dommages évalués à 1,7 milliard de dollars » [traduction] (EPA, 2011).

Tel que décrit au chapitre 4, les pratiques d'utilisation des terres agricoles ont des effets nuisibles quantifiables sur l'environnement aquatique au Canada. Bien que ces effets soient clairement observés, leurs répercussions sur la durabilité à long terme des pratiques agricoles au Canada demeurent essentiellement méconnues en raison d'une insuffisance de données et de recherches sur le terrain. Des évaluations détaillées de la contamination par le phosphore des eaux de surface et de la pollution par les nitrates des nappes d'eaux souterraines sont requises. La préservation de la quantité et de la qualité des ressources hydriques nécessaires dans les régions agricoles exigera des recherches et la collecte de données supplémentaires pour documenter plus précisément le rendement obtenu avec les PGB visant à atténuer au minimum les effets des activités agricoles sur l'environnement. Les priorités de recherche liées aux PGB sont examinées plus en détail dans la réponse du comité d'experts à la sous-question 3.

### **L'agriculture de conservation et l'approche axée sur les services écosystémiques**

Dans le cadre des efforts visant à mieux guider la gestion durable de l'eau en agriculture, le comité d'experts a noté que nous avons aussi la possibilité de revoir notre approche quant au rôle de l'agriculture et aux avantages qu'elle apporte. Tel qu'expliqué à la section 4.4 et en réponse à la sous-question 3, une approche possible est celle de l'agriculture de conservation, qui vise à améliorer la diversité de la production pour renforcer la robustesse et la résilience face au changement,

dans bien des cas en s'appuyant sur des PGB. Une seconde approche, en lien avec la première, part de l'hypothèse que cela peut se faire en changeant notre façon de voir l'agriculture et les agriculteurs, non pas uniquement comme un secteur et des gens qui produisent des aliments, mais comme un secteur et des gens qui contribuent à soutenir et à préserver des terres qui nous procurent un grand nombre de services importants. Le comité d'experts juge qu'une telle évolution est essentielle pour que le Canada demeure un chef de file mondial en agriculture; cependant, pour susciter un tel changement de vision, il faudra effectuer d'autres recherches dans un certain nombre de domaines liés aux services écosystémiques et à l'environnement, en particulier des recherches qui nous aideraient à mieux comprendre les effets des décisions en matière de gestion sur les multiples services écosystémiques, y compris la biodiversité et les habitats (Bennett *et al.*, 2009).

La valeur des biens et services écosystémiques associés aux eaux de surface dans les régions agricoles est encore mal comprise, mais elle retient de plus en plus l'attention à l'échelle internationale. Ainsi, la valeur que représentent les zones de terres humides, les habitats fauniques et la diversité des espèces pour la société devient un facteur clé dans la gestion à long terme des bassins hydrologiques. L'amélioration du drainage des terres agricoles peut avoir une incidence profonde sur ces éléments; pourtant, une compréhension suffisante, reposant sur des données scientifiques, de plusieurs processus de contrôle essentiels pour gérer le drainage agricole de façon durable, y compris le potentiel d'atténuation des risques d'inondation à l'échelle locale et régionale, fait défaut (voir le chapitre 4).

La société devra évaluer les objectifs qu'elle souhaite le plus atteindre et leur attribuer un ordre de priorité. Comme nous l'avons souligné précédemment, cela passe par une meilleure compréhension du cycle de l'eau, des besoins de l'environnement et de l'utilisation actuelle et future de l'eau, en vue de créer une solide base scientifique pour évaluer les arbitrages pertinents. En outre, tel qu'évoqué au chapitre 6 et dans la réponse du comité d'experts à la sous-question 5, des données socioéconomiques, des analyses et des outils sont également nécessaires pour aider à établir la valeur de l'eau, à influencer les comportements et à mobiliser les parties intéressées afin d'arbitrer certains intérêts et usages concurrents.

### Sous-question 3

Quelles connaissances supplémentaires sont requises pour comprendre les pratiques durables et les effets néfastes possibles en lien avec l'utilisation de l'eau dans les régions rurales?

Les approches axées sur la durabilité peuvent contribuer à préserver des écosystèmes sains en réduisant au minimum l'impact de la production agricole sur l'environnement. À cet égard, le comité d'experts s'est intéressé à l'agriculture de conservation et aux PGB, aux possibilités technologiques et aux priorités en matière de recherche et développement, ainsi qu'aux stratégies de mobilisation des intéressés (et à d'autres stratégies de gouvernance et instruments de politique). Les grandes priorités de la recherche définies par le comité d'experts dans chaque domaine sont décrites ci-dessous.

### **Agriculture de conservation et PGB**

Le comité d'experts reconnaît la valeur fondamentale d'une approche axée sur l'agriculture de conservation pour mettre en place des systèmes de production agricole plus résilients et ayant un plus grand potentiel de productivité et d'utilisation efficiente des ressources, en particulier lorsque ces approches sont conçues comme des plateformes d'application de PGB et de technologies agricoles avancées. Le comité estime que des possibilités considérables s'offriraient au Canada afin de développer et de mettre à profit son expertise dans ces domaines.

Les PGB sont des méthodes pratiques, efficaces et peu coûteuses pour atténuer au minimum les répercussions sur l'environnement d'activités économiques telles que la production agricole, et elles constituent un volet important de l'agriculture de conservation. Diverses PGB peuvent contribuer à la durabilité de l'agriculture et de l'environnement agricole, en accroissant l'efficacité de l'utilisation de l'eau ou en protégeant la qualité de l'eau, par exemple. Parmi les différents types de PGB, il y a les bandes riveraines tampons, la rotation des cultures, la remédiation des terres humides, la réduction du travail du sol, le stockage de l'eau sur la ferme et le drainage par canalisations contrôlé (voir le chapitre 4). L'agriculture de conservation et les PGB offrent un excellent potentiel d'amélioration de la durabilité; cependant, elles doivent être étudiées attentivement pour en évaluer l'efficacité et l'aspect pratique. Notamment, il importe d'évaluer les effets négatifs potentiels à l'échelle régionale. Une question fondamentale sur le plan de la politique est la mesure dans laquelle les PGB peuvent produire des résultats compatibles avec les valeurs environnementales recherchées.

Voici certaines questions de recherche clés :

- Quels sont les avantages démontrés et quantifiables du système et de la pratique pour l'environnement?
- Quelles sont les meilleures façons de mesurer les effets sur la biodiversité et les services écosystémiques?



- Quels sont les coûts et les avantages économiques? Qui assume quels coûts (p. ex. les agriculteurs, le gouvernement) et qui profite de quels avantages (p. ex. les agriculteurs, les collectivités rurales, la société canadienne)?
- Quels sont les facteurs sociaux qui influent sur l'adoption (p. ex. les perceptions au sujet des avantages, le niveau de scolarité, la taille de l'exploitation agricole, les sources de revenus)?
- Quels sont les stratégies de gouvernance et les outils de politique les plus efficaces pour promouvoir l'adoption?

Voici quelques enjeux connexes qui retiennent l'attention :

- les effets à l'échelle locale et régionale des changements apportés dans les pratiques de culture et le travail du sol sur les processus de ruissellement et la qualité de l'eau;
- l'incidence du drainage agricole et de la perte de terres humides sur le risque d'inondation, la résilience à la sécheresse, la qualité de l'eau et les habitats, à l'échelle locale et régionale;
- les effets potentiels des PGB sur les charges en nutriments dans les systèmes d'eaux de surface et d'eaux souterraines.

Des connaissances scientifiques supplémentaires sont requises sur l'ensemble de ces aspects, tout comme il faudrait opérer une meilleure intégration transdisciplinaire des connaissances et acquérir une meilleure compréhension de la façon dont ce savoir pourrait être appliqué de façon optimale en fonction des conditions locales. Cela englobe des études sur l'efficacité des normes d'homologation de l'industrie et d'organismes indépendants pour les systèmes d'agriculture de conservation et les PGB. Cependant, une question importante qui n'a pas encore été résolue est la mesure dans laquelle les effets cumulatifs de ces pratiques améliorées peuvent nous permettre d'atteindre les objectifs recherchés sur le plan environnemental.

### Possibilités technologiques

Les technologies actuelles et futures offrent d'importantes possibilités pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la protection de l'environnement tout en accroissant la production et la productivité du secteur agricole (Beddington, 2010; Godfray *et al.*, 2010; Jaggard *et al.*, 2010; Piesse et Thirtle, 2010). Ces possibilités recourent tout un éventail de technologies, dont les techniques d'irrigation et de récolte de l'eau, les semences génétiquement améliorées, les végétaux à caractères nouveaux et les autres biotechnologies, les pesticides à risque réduit, ainsi que les technologies axées sur l'agriculture de précision (voir le chapitre 5). En outre, une meilleure prévision des conditions climatiques, des ressources hydriques,

de la qualité de l'eau et de la demande d'eau permettrait d'améliorer de façon significative l'efficacité de l'utilisation des ressources hydriques et de la gestion de l'eau en agriculture.

Voici quelques questions de recherche primordiales dans ces domaines :

- Quelles technologies offrent le plus d'avantages potentiels sur les plans économique et environnemental pour l'agriculture canadienne? Comment ces avantages sont-ils répartis par rapport aux coûts, entre les différents groupes concernés (p. ex. les agriculteurs, les collectivités rurales, la société canadienne)?
- Quelles sont les technologies qui laissent entrevoir la plus grande promesse de procurer des avantages immédiats à l'agriculture canadienne? Quels sont les meilleurs instruments de politique et stratégies de gouvernance pour encourager l'adoption de ces technologies parmi les producteurs agricoles?
- Quels sont les principaux domaines d'investissement futur en recherche et développement susceptibles d'offrir les avantages potentiels les plus importants au secteur agricole canadien? Quels sont les meilleurs instruments de politique et stratégies de gouvernance pour encourager de tels investissements?

Comme dans le cas des possibilités de recherche axées sur les PGB, les recherches qui pourraient être consacrées à ces technologies doivent être envisagées dans le contexte de bassins hydrographiques, de conditions agricoles et de types de produits particuliers. Étant donné la variation importante dans ces paramètres de la production agricole d'un endroit à l'autre, il n'y a pas de solution universelle convenant à tous les types d'exploitations agricoles et à toutes les régions. Cependant, il est possible de concevoir toute une série d'outils pouvant être adoptés, adaptés et appliqués par les producteurs locaux et d'autres parties.

Outre les questions de recherche primordiales, le comité d'experts a défini un certain nombre de besoins de recherche plus ciblés portant sur des technologies particulières, dont voici quelques exemples :

- mettre à jour nos connaissances sur les façons dont les technologies et les techniques d'irrigation avancées pourraient être appliquées dans les contextes canadiens;
- consolider nos connaissances sur les méthodes de traitement des eaux usées sur la ferme;
- appuyer les efforts canadiens visant à développer de nouvelles semences génétiquement améliorées, des végétaux à caractères nouveaux et d'autres biotechnologies, y compris des variétés et des cultivars nécessitant moins d'eau et résistant plus facilement au stress hydrique, tout en ayant une plus grande tolérance/résistance à la maladie et une plus grande efficacité nutritive;

- étudier les coûts et les avantages potentiels de promouvoir une plus grande adoption de technologies « intelligentes » sur le terrain, par exemple des capteurs installés dans les champs (pour mesurer l'humidité dans le sol), des réseaux de capteurs environnementaux sans fil pour faciliter la prise de décision en temps réel (Díaz *et al.*, 2011; Zerger *et al.*, 2010), des applicateurs à débit variable (ADV) pour l'épandage des produits agrochimiques et des pesticides, des engrais, des fumiers solides et liquides, et des autres déchets biologiques (p. ex. les biosolides provenant de boues de traitement des eaux usées), la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) (Roblin et Barrow, 2000);
- réaliser des projets de démonstration et offrir des services de vulgarisation pour encourager et accroître le déploiement des produits de la recherche et des technologies.

### **Instruments de politique et stratégies de mobilisation des parties intéressées**

L'exploitation des possibilités offertes par les PGB et les technologies doit être accompagnée d'instruments de politique et de stratégies efficaces pour inciter les parties concernées à saisir ces occasions. La gestion durable de l'eau en agriculture dépend de la participation de ces groupes ou de leur sens des responsabilités dans un environnement donné (localité, région ou bassin hydrographique) (Cosgrove et Rijsberman, 2000b). En outre, les producteurs agricoles, les collectivités rurales, le gouvernement fédéral et les provinces, et d'autres acteurs possèdent aussi des connaissances et des renseignements utiles qui pourraient aider à façonner les PGB et les technologies adoptées dans un secteur et concourir à leur application efficace.

Les réponses à cette sous-question portent notamment sur le transfert de connaissances et la mobilisation des parties intéressées. D'autres stratégies de gouvernance et instruments de politique visant à encourager l'adoption de pratiques durables sont abordées dans la réponse du comité d'experts à la sous-question 5.

Le comité d'experts souligne l'importance de bien comprendre que la mobilisation des parties concernées va au-delà de la simple diffusion d'information et doit encourager un dialogue ouvert assorti d'une mise en commun des renseignements et des responsabilités. À l'appui de ce dialogue, il faudrait mener des recherches supplémentaires sur les questions suivantes :

- Quelles sont les meilleures techniques pour prendre en considération les valeurs économiques, environnementales et sociales liées aux ressources hydriques?
- Quels instruments de politique sont les plus appropriés pour s'assurer que ces valeurs soient reflétées dans la façon dont l'eau est utilisée (dans divers contextes économiques, politiques et sociaux)?

- Quelles sont les stratégies d'apprentissage social les plus efficaces qui pourraient être appliquées en vue d'améliorer la durabilité du secteur agricole canadien?
- Quelles formes de transfert et d'échange de connaissances se sont avérées efficaces dans d'autres pays? Comment pourrait-on adapter ces approches à des contextes locaux particuliers au Canada?
- Quel est le potentiel des médias sociaux et d'autres nouveaux médias pour mobiliser les parties intéressées dans un dialogue sur la durabilité et l'adoption de pratiques durables?

Le comité d'experts reconnaît que les stratégies de mobilisation des parties intéressées doivent être adaptées en fonction d'objectifs et d'auditoires précis. Cependant, il soutient qu'une meilleure compréhension des méthodes qui pourraient être les plus efficaces est une première étape essentielle en vue d'élaborer un ensemble d'outils et de techniques pouvant être adaptés et appliqués dans différents bassins hydrographiques et collectivités rurales au Canada.

#### Sous-question 4

Quelles connaissances et méthodes de surveillance supplémentaires sont requises afin de progresser dans la collecte et l'application de données biophysiques pour optimiser l'utilisation de l'eau?

Pour cette sous-question, le comité d'experts a interprété les renseignements « biophysiques » comme étant les données et les connaissances ayant trait au milieu biologique et physique (p. ex. la végétation et les terres humides, la faune, l'hydrologie, les conditions du sol et l'utilisation des terres). Des connaissances supplémentaires et une meilleure surveillance sont requises afin de progresser dans la collecte et l'utilisation de renseignements biophysiques pour optimiser l'utilisation de l'eau. L'amélioration de la collecte de données de surveillance sur la quantité d'eau, la qualité de l'eau et les flux environnementaux (y compris les déterminants météorologiques) et le renforcement de la capacité scientifique requise pour analyser et utiliser ces renseignements figurent parmi les domaines où des progrès pourraient contribuer à une plus grande efficacité dans la gestion durable de l'eau en agriculture. Étant donné les contraintes de ressources, le comité d'experts est d'avis que la collecte de telles données et le développement des connaissances devraient cibler des domaines de préoccupation particuliers en fonction des risques présents. Le comité croit par ailleurs que des recherches visant à établir les priorités en fonction des risques sont nécessaires comme première étape essentielle de ce processus.

### Surveillance de la quantité d'eau

La surveillance de l'eau disponible à des fins agricoles englobe l'évaluation des stocks d'eau, des débits d'eau et de l'utilisation de l'eau, ainsi que l'évolution des profils de disponibilité de l'eau dans le contexte de la variabilité du climat et du changement climatique. Cela requiert tout un éventail de données recueillies sur le terrain et par télédétection, de même que des outils de modélisation. Les données de surveillance qui permettent de déterminer la disponibilité et l'utilisation de l'eau sont présentement adéquates dans certaines régions agricoles, mais inadéquates à plusieurs autres endroits, en particulier dans les régions moins peuplées (voir la section 3.3). En outre, la surveillance fournit des données essentielles pour les modèles servant à appuyer la gestion opérationnelle des terres et de l'eau. Une modélisation et une prévision plus efficaces pourraient engendrer des possibilités importantes pour améliorer la gestion des ressources hydriques et l'utilisation de l'eau sur la ferme.

### Surveillance de la qualité de l'eau

La qualité des ressources hydriques peut être évaluée en fonction de paramètres physiques, chimiques, biologiques ou autres, lesquels sont soumis à des variations considérables dans le temps et dans l'espace sous l'influence des processus naturels et de l'activité humaine. Par conséquent, l'analyse de ces paramètres peut être coûteuse et demander beaucoup de temps. Les ensembles de données nationaux peuvent être très limités en termes de réseaux spatiaux disponibles et de résolution temporelle des échantillons. Le Bureau du vérificateur général du Canada et d'autres organisations sont arrivés à la conclusion que le manque de modalités uniformes de surveillance de la qualité de l'eau au pays entravait la capacité de partager les coûts entre les sphères de compétence, de mettre en commun les renseignements et l'expertise disponibles, et de comparer les données entre les régions (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010; CCME, 2006). Le comité tient à signaler que des questions particulières se posent sur les aspects suivants :

- nitrates et phosphore – l'information actuelle est inadéquate et ne permet pas de définir l'étendue du problème à l'échelle nationale, les effets particuliers des PGB à l'échelle locale et leur impact potentiel à l'échelle régionale;
- les agents pathogènes et les risques connexes de pollution des eaux souterraines;
- de façon plus générale, le manque d'information sur la qualité des eaux souterraines, qui entrave à la fois l'évaluation et la gestion des risques.

### L'argument en faveur d'une meilleure surveillance de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau

Une surveillance efficace revêt une importance critique pour la gestion durable de l'eau. Les ressources hydriques au Canada subissent les pressions du développement urbain, des activités industrielles, de l'agriculture, de la production d'énergie

hydroélectrique et thermique et d'autres facteurs, dont le moindre n'est pas le changement environnemental (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Les renseignements sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau permettent de déceler en temps opportun les menaces émergentes, tandis que des renseignements inadéquats ou insuffisants pourraient nécessiter des efforts de remédiation coûteux qu'il aurait été possible d'éviter (Bureau du vérificateur général du Canada, 2010). Cependant, pour cerner ces menaces, des données de surveillance à diverses échelles spatiales doivent être étudiées et évaluées pour établir des liens de cause à effet. Cela comprend les petits bassins qui se prêtent à une surveillance des répercussions des pratiques agricoles, notamment des PGB. Ces analyses doivent aussi être publiées et diffusées pour promouvoir une meilleure compréhension des conditions actuelles, des tendances et des risques potentiels à l'appui de l'élaboration de politiques efficaces et d'une bonne gestion environnementale (Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011; CCME, 2006). Une préoccupation particulière a trait aux risques engendrés par le changement climatique pour l'agriculture et les ressources hydriques au Canada. Ceux-ci englobent les profils changeants de pluie et de neige, les changements dans les températures et les saisons de croissance, dans les débits des cours d'eau, et la perspective d'inondations et de périodes de sécheresse.

### **L'argument en faveur d'une modélisation prévisionnelle de l'eau au Canada**

Les paramètres afférents aux débits des cours d'eau, aux niveaux des lacs, aux eaux souterraines et à la qualité de l'eau ne peuvent pas tous être mesurés à toutes les échelles; par conséquent, la mesure de l'eau doit se doubler d'une modélisation de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau dans les bassins non jaugés et ceux où il n'est pas possible de prendre des mesures (Sivapalan *et al.*, 2003). Les modèles peuvent aussi être très utiles pour l'exploration des conditions futures qui, par définition, ne sont pas mesurables. Ils peuvent constituer un guide précieux pour la planification et la gestion, par exemple en permettant de simuler les effets potentiels de différentes stratégies de gestion.

### **Conséquences de la surveillance et de la modélisation pour la gestion de l'eau en agriculture : favoriser une gestion adaptative**

L'agriculture est concernée par la surveillance, la modélisation et les autres méthodes de gestion des risques inhérents à la production agricole. Pour ce qui est de la modélisation des bassins des cours d'eau, le comité d'experts souligne que certaines provinces ont une capacité de modélisation pour la prévision et la gestion des approvisionnements en eau et la prévision des crues, mais qu'il n'y a pas de modélisation opérationnelle continue de la qualité des eaux au Canada. Le comité note également que les complexités de l'hydrologie dans une région froide

posent de redoutables défis pour la simulation à la fois des conditions hydrologiques et de la qualité de l'eau et qu'il y a un besoin particulier d'améliorer la capacité d'illustrer les effets de la gestion agricole, y compris des PGB.

Une solide capacité de surveillance et de modélisation est requise pour gérer les risques futurs à une époque marquée par la non-stationnarité. Dans un rapport traitant des effets du réchauffement climatique sur les conditions hydrologiques extrêmes, la National Academy of Sciences (NAS) des États-Unis affirme que « la surveillance fondamentale des éléments clés du cycle hydrologique crée une ressource d'information inestimable qui a une importance particulièrement critique dans un environnement non stationnaire » [traduction] (NAS, 2011). Le rapport de la NAS insiste sur la nécessité de disposer d'un solide réseau d'observation des conditions météorologiques et de l'eau, mais il ajoute que cela ne saurait remplacer des avancées au niveau prévisionnel : « le fait de se fier à une analyse a posteriori qui repose sur des observations – même si cela est pratique à court terme – pourrait masquer la valeur intrinsèque de la recherche visant à établir la causalité et à améliorer la prévision » [traduction]. Le comité d'experts signale que la capacité de surveillance et de prévision au Canada n'est pas aussi développée qu'aux États-Unis et il estime que la mise en place d'une meilleure capacité de surveillance et de prévision au Canada permettrait de mieux gérer les risques en agriculture à la lumière de la non-stationnarité sans précédent des conditions hydrométéorologiques imputable au changement climatique.

La production d'estimations plus précises de la probabilité d'événements hydrométéorologiques extrêmes et de l'approvisionnement en eau pourrait faciliter une gestion adaptative des activités agricoles et la conception de meilleures techniques de gestion de l'eau pouvant s'appliquer au Canada. Cela est d'autant plus important que la non-stationnarité attribuable au changement climatique engendre une incertitude sérieuse pour l'agriculture à l'échelle mondiale (Nelson *et al.*, 2010). Une gestion adaptative sera nécessaire dans le secteur agricole canadien en raison des extrêmes plus marqués au chapitre des inondations et des périodes de sécheresse, dans un contexte de changement climatique et d'évolution des conditions hydrométéorologiques caractérisé par une diminution des chutes de neige et du ruissellement provenant de la fonte des neiges. Les variations interannuelles croissantes des conditions hydrométéorologiques obligeront les gestionnaires de terres agricoles et d'autres parties à recourir à un éventail plus large de techniques de gestion pouvant être déployées le plus rapidement possible (Pahl-Wostl, 2007; UNESCO, 2012). La plus grande diversité des pratiques de gestion sur la ferme pourrait aussi être un facteur important pour la résilience de la production agricole devant l'incertitude élevée des prévisions et la non-stationnarité hydrométéorologique.

## Le besoin de mieux comprendre les habitats terrestres et aquatiques et les flux environnementaux

Comprendre les effets sur les écosystèmes des changements qui se produisent dans la quantité d'eau et la qualité de l'eau est un autre aspect fondamental sur lequel des connaissances plus poussées pourraient contribuer à une gestion durable. Cela s'applique globalement à la quantification de la contribution potentielle de l'agriculture aux services écosystémiques. Plus précisément, les données quantitatives, détaillées et synthétiques, sur les flux d'eau nécessaires dans l'environnement pour préserver les habitats et maintenir la biodiversité au Canada sont plutôt rares. Bien que l'on soit généralement conscient que les efforts visant à maximiser la production agricole sans tenir compte des conséquences qui en découlent pour l'environnement peuvent provoquer une baisse de la biodiversité et des services écosystémiques, la compréhension des interactions entre ces services et la façon dont ces interactions peuvent être utilisées pour réduire les arbitrages et accroître les synergies est extrêmement limitée (Bennett *et al.*, 2009). À titre d'exemple, nous n'avons pas une compréhension quantitative (du moment et de la quantité) des flux requis pour préserver la biodiversité des habitats dans un vaste éventail d'écosystèmes au Canada. Même s'il existe d'excellentes études détaillées, portant sur des endroits particuliers, nous n'avons pas de synthèse de ces travaux pour l'ensemble des régions, des systèmes de culture et des régimes de gestion (Bennett *et al.*, 2009). Cela soulève toute une série de questions subsidiaires au sujet des habitats, de la biodiversité et de la gestion de l'eau en milieu agricole. Ainsi, la relation entre les flux d'eau et les habitats aquatiques est-elle linéaire ou comporte-t-elle des seuils et des éléments de non-linéarité? Le cas échéant, la question devient : Quels sont les niveaux critiques de ces flux au-delà desquels nous franchissons les seuils pertinents à divers organismes?

### Sous-question 5

Quelles autres informations et analyses socio-économiques et environnementales doivent être prises en compte dans la gestion durable de l'eau en milieu rural?

## Pratiquer et faciliter une gouvernance efficace

À la lumière de ses recherches et de ses délibérations, le comité d'experts est arrivé à la conclusion qu'une gouvernance efficace est une condition essentielle à la gestion durable de l'eau en agriculture. Au Canada, la gouvernance de l'eau est très fragmentée et les responsabilités sont partagées entre les divers paliers de gouvernement. Il y a actuellement une grande variété de modèles de gouvernance de l'eau, y compris les cadres réglementaires traditionnels, les processus de collaboration, les mécanismes du marché et des combinaisons des trois. Les



rôles assumés par les acteurs non gouvernementaux, les peuples autochtones, les groupes de la société civile et les entreprises ont acquis plus d'importance et ils ont évolué par rapport aux décennies antérieures. En conséquence, toute une série de défis nouveaux se posent sur les plans de l'efficacité, de la capacité, de la légitimité et de l'imputabilité des décisions de gestion. Enfin, il y a une compréhension inégale de la meilleure façon de s'attaquer à ces défis. Ce qui est important, il n'y a pas de solution unique pouvant être appliquée efficacement dans toutes les sphères de compétence. Le comité d'experts s'est donc tourné vers des pratiques et des principes prometteurs dont l'efficacité a été démontrée pour appuyer une gestion durable des ressources hydriques.

*S'assurer que la gouvernance s'effectue à l'échelle appropriée.* Les ressources en eau ne correspondent pas aux frontières municipales, provinciales ou nationales et il est possible que les décisions prises à un niveau ou à un endroit en particulier se répercutent sur les autres. Les bassins hydrographiques peuvent offrir une échelle utile pour la coordination des décisions et des mesures; en gérant les ressources à cette échelle, l'intégration des efforts de gestion et des connaissances est possible, ce qui entraîne une gouvernance plus efficace des ressources hydriques (section 6.1).

*Intégrer la planification de l'utilisation des terres aux décisions relatives à la gestion de l'eau.* L'utilisation des terres et la gestion de l'eau sont interdépendantes, et les décisions portant sur l'un de ces éléments influenceront sur l'autre. L'agriculture peut avoir des répercussions à la fois sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau dans un bassin hydrographique, tandis que d'autres décisions relatives à l'utilisation des terres, par exemple l'exploitation de ressources naturelles ou la construction d'un barrage hydroélectrique, auront un impact sur la disponibilité de l'eau pour d'autres utilisations telles que l'irrigation. L'intégration des décisions relatives à l'utilisation des terres et à la gestion de l'eau pourra contribuer à produire les meilleurs résultats possibles pour le plus grand nombre d'acteurs en limitant l'impact de ces décisions sur l'environnement, l'économie et la société. Globalement, les stratégies intégrées de gestion de l'eau tiendront compte des besoins de l'agriculture et des autres formes d'utilisation, tout en assurant une gestion durable de l'eau à long terme (section 6.1).

*Associer les parties intéressées au processus décisionnel.* Les décisions relatives à la gestion de l'eau touchent de bien des façons la vie des gens établis dans un bassin hydrographique et elles comportent souvent des arbitrages entre des utilisations concurrentes. Il importe de tenir compte des points de vue et des préoccupations des groupes concernés, à l'intérieur et hors du secteur agricole, au moment de prendre des décisions en lien avec la gestion de l'eau qui ont aussi une incidence sur l'agriculture. De même, il est essentiel de faire participer le public

au processus décisionnel (section 6.3). Bien que la nature de la collaboration et les outils d'intégration de la participation doivent refléter les circonstances locales, il y a toute une gamme de possibilités pouvant être adaptées pour répondre à diverses conditions. Pour être efficaces, les stratégies de transfert des connaissances employées doivent être choisies en fonction du type d'information à communiquer, de l'auditoire et des objectifs visés. Des recherches supplémentaires s'imposent sur les stratégies de transfert des connaissances qui ont trait à l'agriculture et à l'utilisation de l'eau afin d'accroître l'efficacité de la communication entre le gouvernement et les parties intéressées. Voir la section 6.3 et la réponse du comité d'experts à la sous-question 3 pour d'autres détails.

*Intégrer les connaissances au processus décisionnel.* L'information scientifique est un outil qui devrait être employé pour aider les responsables des politiques et les parties intéressées à comprendre les avantages et les arbitrages d'une décision. En outre, la science peut être un outil servant à éclairer les gouvernements et le public au sujet des coûts de ne rien faire. La contribution scientifique doit s'appuyer sur des données et des analyses solides, et elle doit être prise en considération par les responsables des politiques dans le processus décisionnel (section 6.1). Le comité d'experts a constaté que le gouvernement du Royaume-Uni et ceux d'autres pays avaient eu recours à des études prévisionnelles en vue d'éclairer les priorités de la recherche et des politiques (section 3.6). Le comité croit que l'utilisation de tels outils devrait inclure un examen des réponses potentielles à des événements catastrophiques d'envergure (p. ex. des sécheresses graves, des conditions climatiques extrêmes) afin d'être mieux préparés à faire face à des problèmes sérieux le cas échéant. Outre les connaissances scientifiques, une gestion et une gouvernance efficaces de l'eau doivent intégrer les enseignements tirés de l'expertise pratique, du savoir autochtone et des connaissances locales. L'intégration de la connaissance scientifique et des autres formes de savoir aux processus décisionnels peut mener à des solutions plus robustes tenant davantage compte de la nature complexe et interdépendante des défis actuels de la gestion et de la gouvernance de l'eau. La recherche transdisciplinaire, dans le cadre de laquelle des chercheurs et des partenaires de la collectivité agricole, de l'industrie et du gouvernement définissent conjointement les problèmes et les programmes de recherche, est un important moyen de faciliter la co-production de connaissances.

### **Instruments économiques à l'appui d'une gestion durable de l'eau**

La politique agricole influe fortement sur les décisions des parties intéressées qui ont une incidence sur l'utilisation de l'eau en agriculture. La politique agricole s'efforce souvent de préserver la compétitivité économique du secteur tout en répondant aux préoccupations environnementales et sociales. À la lumière des expériences observées au Canada et ailleurs dans le monde, lorsque les instruments

économiques sont conçus et déployés de manière appropriée, ils peuvent concourir à une gestion durable de l'eau. Le comité d'experts a étudié le potentiel des techniques d'évaluation économique, des incitatifs économiques, des prix et des marchés de l'eau sous l'angle de leur contribution à la gestion durable de l'eau en agriculture. Il serait nécessaire d'étudier aussi la façon dont ces outils pourraient être employés efficacement dans le contexte canadien ainsi que les mécanismes permettant d'en mesurer le succès.

*Techniques d'évaluation économique.* L'eau possède des valeurs économiques, environnementales et sociales qui doivent entrer en ligne de compte au moment de prendre des décisions portant sur la gestion de la ressource. Une façon d'établir la valeur des écosystèmes soutenus par les ressources aquatiques est de déterminer la valeur économique totale (VET) des services écosystémiques. L'approche de la VET englobe les valeurs associées tant à l'utilisation de l'eau (p. ex. l'irrigation, l'eau potable) qu'à la non-utilisation de cette ressource (p. ex. la biodiversité, le patrimoine culturel).

*Les incitatifs économiques* sont un autre mécanisme qui peut être employé pour aider à façonner les comportements de manière à préserver la quantité et la qualité des ressources hydriques. Les paiements versés pour l'adoption volontaire de PGB, la tarification des services écosystémiques (TSE), les signaux inhérents aux prix et les marchés pour l'échange des droits d'utilisation de l'eau sont des exemples de mesures d'incitation économique. Ces instruments ont chacun des avantages et des inconvénients qui devraient être pris en compte en cherchant à atteindre des objectifs particuliers. Le comité d'experts arrive à la conclusion que des recherches sont nécessaires afin de déterminer comment les incitatifs économiques peuvent être employés pour atteindre l'objectif d'une gestion durable de l'eau dans le contexte de l'agriculture canadienne.

*Les prix* sont un mécanisme du marché qui peut servir à promouvoir des comportements durables en créant une incitation économique à adopter de meilleures pratiques de gestion de l'eau. Pour ce qui est des systèmes d'eau potable, une hausse du prix de l'eau visant à refléter sa valeur totale et le coût total de la prestation des services connexes est perçue comme un moyen de promouvoir l'utilisation plus efficiente des ressources hydriques. Le comité d'experts arrive à la conclusion que des questions importantes se posent au sujet de la capacité des agriculteurs de payer, individuellement, un prix plus élevé pour l'eau qu'ils utilisent, et il a noté que les expériences provenant des systèmes urbains d'eau potable ne sont peut-être pas facilement transposables au secteur agricole.

Les *marchés de l'eau*, où les droits d'accès à l'eau peuvent être échangés, constituent un autre mécanisme pouvant servir à promouvoir l'utilisation efficiente des ressources hydriques. Les marchés de l'eau permettent de déplacer l'eau de secteurs où elle a une faible valeur vers des secteurs où elle a une valeur élevée – parfois au sein même de l'industrie agricole, mais souvent d'utilisations agricoles vers des utilisations non agricoles. De nombreux mécanismes ont été mis au point pour transférer de l'eau de façon temporaire ou permanente en utilisant des outils économiques. Les marchés de l'eau existent dans plusieurs pays, y compris le Canada (où ils sont utilisés en Alberta pour faciliter le transfert temporaire ou permanent des droits d'utilisation de l'eau). Comme pour tout instrument de politique, les mécanismes du marché suscitent des préoccupations et posent certains obstacles. Parmi ceux-ci, il y a le malaise public devant la marchandisation de l'eau et les questions entourant la capacité des marchés de répondre à des besoins environnementaux non commercialisables. Le comité d'experts observe également que les conditions préalables à la création de marchés de l'eau ne sont pas présentes dans plusieurs régions du Canada.

### 7.3 RÉFLEXIONS FINALES

Gérer l'eau de façon durable est essentiel pour l'avenir du secteur agricole canadien et pour la société canadienne. L'eau est un intrant critique non seulement pour la production agricole, mais pour de nombreuses autres activités économiques et sociales et – ce qui est le plus important – pour la santé de l'environnement. Alors que la population mondiale et les revenus continueront d'augmenter, la demande pour les produits de l'agriculture ira en s'accroissant. Ces tendances engendreront des pressions accrues sur les ressources hydriques, terrestres et autres, au Canada comme à l'étranger, ce qui placera l'agriculture en concurrence pour ces ressources avec les municipalités, l'industrie et l'environnement. Un défi redoutable est que ces pressions se manifestent dans un contexte de changement climatique qui s'accompagne d'un niveau élevé d'incertitude. Pour relever ces défis, l'agriculture et les autres industries devront produire plus d'aliments et d'autres produits avec moins d'eau et de terres, et un impact moins grand sur l'environnement par unité de production. Il faudra également concevoir de nouvelles solutions au niveau des politiques, de la gouvernance et de la gestion afin d'assurer à l'eau et au secteur agricole un avenir robuste et résilient.

Dans ce rapport, le comité d'experts a exposé de nombreuses options qui s'offrent aux producteurs agricoles, aux responsables des politiques et aux autres parties intéressées pour mieux guider la gestion durable de l'eau en agriculture. Des recherches prévisionnelles portant sur les possibilités, les risques et les incertitudes, la mise en œuvre de PGB, le développement d'innovations technologiques,

ainsi que l'utilisation de stratégies de gouvernance et d'instruments de politique pourraient contribuer à cette entreprise. Les décideurs devront adapter et appliquer ces solutions aux conditions particulières de leurs sous-secteurs, de leurs bassins hydrographiques, de leurs territoires et de leurs régimes de réglementation et à d'autres conditions locales. Les changements nécessaires exigeront des recherches supplémentaires, une collaboration entre les divers acteurs, ainsi que du temps et des investissements. Il faudra aussi un effort coordonné de la part de toutes les parties intéressées, dans leurs domaines de responsabilité respectifs. Pour que le secteur agricole canadien demeure concurrentiel et résilient dans l'avenir, il est indispensable que ces efforts débutent sans délai pour s'assurer que l'agriculture canadienne demeure un chef de file mondial au chapitre de la productivité et de l'innovation, ainsi qu'un contributeur important à la croissance économique et à la sécurité alimentaire du Canada.

## Références

- AAC, 2003a – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Analyse des questions relatives à l'approvisionnement en eau agricole. Sommaire national. Rapport Final*. Ottawa (ON) : AAC.
- AAC, 2003b – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Rapport Final : Les questions d'approvisionnement en eau pour le secteur de l'agriculture - Nouvelle Écosse, Nouveau-Brunswick, Île-du-Prince-Édouard et Terre-Neuve-et-Labrador*. Préparé par CBCL Limited.
- AAC, 2003c – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Rapport final : Analyse des problèmes relatifs à l'approvisionnement en eau agricole - Programme national d'approvisionnement en eau - Provinces des Prairies*. Ottawa (ON) : Préparé par UMA Ltd.
- AAC, 2007a – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *L'agriculture dans un monde où l'eau est rare (Question de politiques agricoles)*. Ottawa (ON) : AAC.
- AAC, 2007b – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Programme de gérance agroenvironnementale Canada-Manitoba*. Adresse URL : <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1184006323781&lang=fra> (dernière consultation : avril 2012).
- AAC, 2008 – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Initiative sur les normes agroenvironnementales nationales (INAEN)*. Adresse URL : <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1209128121608&lang=fra> (dernière consultation : avril 2012).
- AAC, 2010a – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Le cycle hydrologique*. Adresse URL : <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1267802885509&lang=fra> (dernière consultation : avril 2012).
- AAC, 2010b – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à bêche des bassins hydrographiques (EPHB) : pour une planification améliorée du paysage agricole - examen quadriennal (2004/5-2007/8)*. Ottawa (ON) : AAC.
- AAC et Ministère de l'Agriculture de la Saskatchewan, 2011 – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA et MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE LA SASKATCHEWAN. *Canada-Saskatchewan Farm Stewardship Program. Cost-Shared Incentives for Beneficial Management Practices*. AAC et le Ministère de l'Agriculture de la Saskatchewan.
- AAC, 2011a – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Traçons l'avenir en route vers 2020. Document de discussion. Cultivons l'avenir 2*. Ottawa (ON) : AAC.
- AAC, 2011b – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Cultivons l'avenir 2. Énoncé de Saint Andrews*. Ottawa (ON) : AAC.
- AAC, 2011c – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Vue d'ensemble du système agricole et agroalimentaire canadien 2011*. Adresse URL : <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1295963199087&lang=fra> (dernière consultation : avril 2012).

- AAC, 2011d – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *À propos de nous. Évaluation des pratiques de gestions bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques*. Adresse <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1296246973332&lang=fra> (dernière consultation: novembre, 2012).
- AAC, 2012 – AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. *Vue d'ensemble du système agricole et agroalimentaire canadien 2012*. Ottawa (ON) : AAC.
- Acevedo, 2011 – ACEVEDO, M. F. « Interdisciplinary progress in food production, food security and environment research », *Environmental Conservation*, vol. 38, n°2, p. 151-171.
- ACIA, 1997 – AGENCE CANADIENNE D'INSPECTION DES ALIMENTS. *T-4-116 - Enregistrement des polyacrylamides et copolymères (acrilamide-acrylate) sous l'autorité de la Loi sur les engrais : Exigences vis-à-vis la sécurité*. Adresse URL : <http://www.inspection.gc.ca/vegetaux/engrais/circulaires-a-la-profession/t-4-116/fra/1307904695355/1307904815709> (dernière consultation : juillet 2012).
- ACIA, 2011a – AGENCE CANADIENNE D'INSPECTION DES ALIMENTS. *Végétaux à caractères nouveaux*. Adresse URL : <http://inspection.gc.ca/vegetaux/vegetaux-a-caracteres-nouveaux/fra/1300137887237/1300137939635> (dernière consultation : avril 2012).
- ACIA, 2011b – AGENCE CANADIENNE D'INSPECTION DES ALIMENTS. *Essais en conditions confinées au printemps 2011*. Adresse URL : [http://www.inspection.gc.ca/francais/plaveg/bio/st/st\\_11f.shtml](http://www.inspection.gc.ca/francais/plaveg/bio/st/st_11f.shtml) (dernière consultation : juillet 2012).
- Agriculture Canada et Ministère de l'Agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, 1994 – AGRICULTURE CANADA ET MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES DE L'ONTARIO. *Les pratiques de gestions optimales : La gestion de l'eau*. Ottawa (ON) : Agriculture Canada et le Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.
- Al Hattab et Ghaly, 2012 – AL HATTAB, M. T. et GHALY, A. E. « Disposal and treatment methods for pesticide containing wastewaters: Critical review and comparative analysis », *Journal of Environmental Protection*, vol. 3, n°5, p. 431-453.
- Alberta Environment, 2003 – ALBERTA ENVIRONMENT. *Water Act. Administrative Guidelines for Transferring Water Allocations*. Edmonton (AB) : Alberta Environment.
- Alberta Environment, 2006 – ALBERTA ENVIRONMENT. *Approved Water Management Plan for the South Saskatchewan River Basin (Alberta)*. Calgary (AB) : Alberta Environment.



- Alberta Environment, 2008 – ALBERTA ENVIRONMENT. *Glossary of Terms Related to Water and Watershed Management in Alberta. 1<sup>re</sup> édition*. Edmonton (AB) : Alberta Environment, Partnerships & Strategies Section.
- Alberta Environmental Monitoring Panel, 2011 – ALBERTA ENVIRONMENTAL MONITORING PANEL. *A World Class Environmental Monitoring, Evaluation and Reporting System for Alberta. The Report of the Alberta Environmental Monitoring Panel*. Edmonton (AB) : Alberta Environmental Monitoring Panel.
- Alberta Riparian Habitat Management Society, s.d. – ALBERTA RIPARIAN HABITAT MANAGEMENT SOCIETY. *Page d'accueil*. Adresse URL : <http://www.cowsandfish.org/index.html> (dernière consultation : juillet 2012).
- Alderfasi et Nielsen, 2001 – ALDERFASI, A. A. et NIELSEN, D. C. « Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat », *Agricultural Water Management*, vol. 47, p. 69-75.
- Allen *et al.*, 1998 – ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. et SMITH, M. *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Allen *et al.*, 2011 – ALLEN, C. R., FONTAINE, J. J., POPE, K. L. et GARMESTANI, A. S. « Adaptive management for a turbulent future », *Journal of Environmental Management*, vol. 92, p. 1339-1345.
- ALUS, 2011 – ALTERNATIVE LAND USE SERVICES. *Page d'accueil*. Adresse URL : <http://www.alus.ca/> (dernière consultation : avril 2012).
- Anderson, 2010a – ANDERSON, K. « Globalization's effects on world agricultural trade, 1960–2050 », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, n°1554, p. 3007-3021.
- Anderson, 2010b – ANDERSON, W. K. « Closing the gap between actual and potential yield of rainfed wheat. The impacts of environment, management and cultivar », *Field Crops Research*, vol. 116, n°1-2, p. 14-22.
- Anderson et Jackson, 2012 – ANDERSON, K. et JACKSON, L. A. *GMOs: Trade and Welfare Impacts of Current Policies*. Dans, *Research Handbook on the WTO Agriculture Agreement. New and Emerging Issues in International Agricultural Trade Law*. McMahan, J. A. et Geboye Desta, M. (édit.). Northampton (MS) : Edward Elgar Publishing Limited.
- Angus *et al.*, 2009 – ANGUS, A., BURGESS, P. J., MORRIS, J. et LINGARD, J. « Agriculture and land use: Demand for and supply of agricultural commodities, characteristics of the farming and food industries, and implications for land use in the UK », *Land Use Policy*, vol. 26S, p. S230-S242.
- Anonyme, 2009 (8 avril) – ANONYME. *Awash in Waste*. The Economist.

- Ansell et Gash, 2008 – ANSELL, C. et GASH, A. « Collaborative governance in theory and practice », *Journal of Public Administration Research and Theory*, vol. 18, p. 543-571.
- Antill, 1990 – ANTILL, D. N. *A Review of Crop Covers and Mulches for Field Vegetables. Report Commissioned by The Horticultural Development Council*. Selby, Royaume-Uni : Horticulture Research International, Stockbridge House.
- Arias-Estévez *et al.*, 2008 – ARIAS-ESTÉVEZ, M., LÓPEZ-PERIAGO, E., MARTÍNEZ-CARBALLO, E., SIMAL-GÁNDARA, J., MEJUTO, J. C. et GARCÍA-RÍO, L. « The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 123, n°4, p. 247-260.
- Armitage *et al.*, 2012 – ARMITAGE, D., DE LOË, R. et PLUMMER, R. « Environmental governance and its implications for conservation practice », *Conservation Letters*, vol. 5, n°4, p. 245-255.
- Armstrong *et al.*, 2008 – ARMSTRONG, R. N., POMEROY, J. W. et MARTZ, L. W. « Evaluation of three evaporation estimation methods in a Canadian prairie landscape », *Hydrological Processes*, vol. 22, n°15, p. 2801-2815.
- Ashraf *et al.*, 2011 – ASHRAF, M., AKRAM, N. A., AL-QURAINY, F. et FOOLAD, M. R. « Drought tolerance: Roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients », *Advances in Agronomy*, vol. 111, p. 249-296.
- Atari *et al.*, 2009 – ATARI, D. O. A., YIRIDOE, E. K., SMALE, S. et DUINKER, P. N. « What motivates farmers to participate in the Nova Scotia environmental farm plan program? Evidence and environmental policy implications », *Journal of Environmental Management*, vol. 90, n°2, p. 1269-1279.
- Ayers et Wescot, 1985 – AYERS, R. S. et WESCOT, D. W. *Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Aylward *et al.*, 2010 – AYLWARD, B., SEELY, H., HARTWELL, R. et DENGEL, J. *The Economic Value of Water for Agriculture, Domestic and Industrial Uses: A Global Compilation of Economic Studies and Market Prices*. Bend (OR) : Ecosystem Economics pour FAO.
- Babatunde et Zhao, 2007 – BABATUNDE, A. O. et ZHAO, Y. Q. « Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses », *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 37, n°2, p. 129-164.
- Backeberg et Sanewe, 2006 – BACKEBERG, G. R. et SANEW, A. J. « The research and development strategy for water utilisation in agriculture – responding to diverse needs of farmers in South Africa », *Irrigation and Drainage*, vol. 55, n°3, p. 281-290.

- Baig et Gamache, 2009 – BAIG, M. N. et GAMACHE, P. M. *The Economic, Agronomic and Environmental Impact of No-Till on the Canadian Prairies*. Edmonton (AB) : Alberta Reduced Tillage Linkages.
- Bak et Jakobsen, 2004 – BAK, T. et JAKOBSEN, H. « Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection », *Biosystems Engineering*, vol. 87, n°2, p. 125-136.
- Bakker, 2007a – BAKKER, K. *Commons or Commodity? The Debate Over Private Sector Involvement in Water Supply*. Dans, *Eau Canada. The Future of Canada's Water*. Bakker, K. (édit.). Vancouver (BC) : UBC Press.
- Bakker, 2007b – BAKKER, K. *Introduction*. Dans, *Eau Canada: The Future of Canada's Water*. Bakker, K. (édit.). Vancouver (BC) : UBC Press.
- Bakker et Cook, 2011 – BAKKER, K. et COOK, C. « Water governance in Canada: Innovation and fragmentation », *Water Resources Development*, vol. 27, n°2, p. 275-289.
- Ballard *et al.*, 2011 – BALLARD, C., MCINTYRE, N., WHEATER, H. S., HOLDEN, J. et WALLAGE, Z. E. « Hydrological modelling of drained blanket peatland », *Journal of Hydrology*, vol. 407, n°1-4, p. 81-93.
- Banque mondiale, 2010 – BANQUE MONDIALE. *Gérer les terres et l'eau afin de nourrir neuf milliards d'êtres humains et protéger les systèmes naturels*. Dans, *Rapport sur le développement dans le monde 2010. Développement et changement climatique*. Washington (DC) : La Banque internationale pour la reconstruction et le développement, Banque mondiale.
- Baran *et al.*, 2011 – BARAN, W., ADAMEK, E., ZIEMIAŃSKA, J. et SOBCZAK, A. « Effects of the presence of sulfonamides in the environment and their influence on human health », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 196, p. 1-15.
- Barrow *et al.*, 2004 – BARROW, E., MAXWELL, B. et GACHON P. (édit.). *Climate Variability and Change in Canada: Past, Present and Future*. ACS Science Assessment Series No. 2. Toronto (ON) : Service météorologique du Canada, Environnement Canada.
- Beaulieu *et al.*, 2001 – BEAULIEU, M. S., FRIC, C. et SOULARD, F. *Estimation de la quantité d'eau utilisée à des fins agricoles en 2001. Série de documents de travail sur l'agriculture et le milieu rural*. Ottawa (ON) : Statistique Canada.
- Beddington, 2010 – BEDDINGTON, J. « Food security: Contributions from science to a new and greener revolution », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, p. 61-71.
- Belton et Stewart, 2002 – BELTON, V. et STEWART, T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Norwell (MA) : Kluwer Academic Publishers.

- Bennett et Balvanera, 2007 – BENNETT, E. M. et BALVANERA, P. « The future of production systems in a globalized world », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 5, n°4, p. 191-198.
- Bennett *et al.*, 2009 – BENNETT, E. M., PETERSON, G. D. et GORDON, L. J. « Understanding relationships among multiple ecosystem services », *Ecology Letters*, vol. 12, p. 1-11.
- Bessette, 2004 – BESSETTE, G. *Les outils: Utiliser les outils de communication avec une approche participative*. Dans, *Communication et participation communautaire. Guide Pratique de communication participative pour le développement*. Québec (QC) : Les Presses de l'Université Laval, CRDI.
- Bianchi et Harter, 2002 – BIANCHI, M. et HARTER, T. *Nonpoint Sources of Pollution in Irrigated Agriculture. Publication 8055, FWQP Reference Sheet 9.1*. Oakland (CA) : Division of Agriculture and Natural Resources, Université de la Californie.
- Bisconer, 2010 – BISCONER, I. « Why field crop growers love drip irrigation: Alfalfa, corn, cotton, onions, potatoes and processing tomatoes », *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*, vol. 3, p. 2061-2090.
- Björklund *et al.*, 2009 – BJÖRKLUND, G., CONNOR, R., GOUJON, A., HELLMUTH, M., MORLARTY, P., RAST, W., . . . WINPENNY, J. *Chapitre 2, Moteurs démographiques, économiques et sociaux*. Dans, *L'eau dans un monde qui change. 3<sup>e</sup> Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*. Paris, France.
- Bjornlund et McKay, 2002 – BJORNLUND, H. et MCKAY, J. « Aspects of water markets for developing countries: Experiences from Australia, Chile, and the US », *Environment and Development Economics*, vol. 7, n°4, p. 769-795.
- Blackburn, 1994 – BLACKBURN D.J. (édit.). *Extension Handbook. Processes and Practices*. 2<sup>e</sup> éd. Lewiston (NY) : Thompson Educational Publishing Inc.
- Blackmore *et al.*, 2005 – BLACKMORE, S., STOUT, B., WANG, M. et RUNOV, B. *Robotic Agriculture – The Future of Agricultural Mechanization*. Article présenté dans le cadre du Precision Agriculture 05 - 5th European Conference on Precision Agriculture. Uppsala, Suède
- Blackshaw *et al.*, 1998 – BLACKSHAW, R. E., MOLNAR, L. J., CHEVALIER, D. F. et LINDWALL, C. W. « Factors affecting the operation of the weed-sensing Detectspray system », *Weed science*, vol. 46, p. 127-131.
- Boardman *et al.*, 1994 – BOARDMAN, J., LIGNEAU, L., DE ROO, A. et VANDAELE, K. « Flooding of property by runoff from agricultural land in northwestern Europe », *Geomorphology*, vol. 10, n°1-4, p. 183-196.
- Boardman, 1995 – BOARDMAN, J. « Damage to property by runoff from agricultural land, South Downs, southern England, 1976-93 », *Geographical Journal*, vol. 161, n°2, p. 177-191.

- Boehlje et Bröring, 2011 – BOEHLJE, M. et BRÖRING, S. « The increasing multifunctionality of agricultural raw materials: Three dilemmas for innovation and adoption », *International Food and Agribusiness Management Review*, vol. 14, n°2, p. 1-16.
- Bogena *et al.*, 2007 – BOGENA, H. R., HUISMAN, J. A., OBERDÖRSTER, C. et VERECKEN, H. « Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications », *Journal of Hydrology*, vol. 344, n°1-2, p. 32-42.
- Bohlen *et al.*, 2009 – BOHLEN, P.J., LYNCH, S., SHABMAN, L., CLARK, M., SHUKLA, S. et SWAIN, H. « Paying for environmental services from agricultural lands: An example from the northern Everglades », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 7, n°1, p. 46-55.
- Bonsal *et al.*, 2011 – BONSAI, B. R., WHEATON, E. E., CHIPANSHI, A. C., LIN, C., SAUCHYN, D. J. et WEN, L. « Drought research in Canada: A review », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, n°4, p. 303-319.
- Bonsal *et al.*, 2012 – BONSAI, B. R., AIDER, R., GACHON, P. et LAPP, S. « An assessment of Canadian prairie drought: Past, present, and future », *Climate Dynamics*, DOI :10.1007/s00382-00012-01422-00380.
- Boubetra *et al.*, 2011 – BOUBETRA, A., LE NESTOUR, F., ALLAERT, C. et FEINBERG, M. « Validation of alternative methods for the analysis of drinking water and their application to *Escherichia coli* », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 77, n°10, p. 3360-3367.
- Boxall *et al.*, 2003 – BOXALL, A. B. A., KOLPIN, D. W., HALLING-SØRENSEN, B. et TOLLS, J. « Are veterinary medicines causing environmental risks? », *Environmental Science & Technology*, vol. 37, p. 286-294.
- Brandt, 2009 – BRANDT, S. *An Agronomic Systems Approach to Innovation*. Article présenté dans le cadre du Landscapes Transformed: The Quiet Triumph of Conservation Tillage and Direct Seeding. Saskatoon (SK).
- Brisson *et al.*, 2010 – BRISSON, G., RICHARDSON, M. et GAGNÉ, D. *Relation entre l'agriculture et la qualité de vie des communautés rurales et périurbaines*. Québec (QC) : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec.
- Bronstert *et al.*, 2002 – BRONSTERT, A., NIEHOFF, D. et BÜRGER, G. « Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities », *Hydrological Processes*, vol. 16, n°2, p. 509-529.
- Brooks et Loevinsohn, 2011 – BROOKS, S. et LOEVINSOHN, M. « Shaping agricultural innovation systems responsive to food insecurity and climate change », *Natural Resources Forum*, vol. 35, p. 185-200.
- Brouwer *et al.*, 1985 – BROUWER, C., GOFFEAU, A. et HEIBLOEM, M. *Irrigation Water Management: Training Manual No. 1 - Introduction to Irrigation*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

- Brouwer et Heibloem, 1986 – BROUWER, C. et HEIBLOEM, M. *Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs. Training Manual No. 3*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Brouwer *et al.*, 1988 – BROUWER, C., PRINS, K., KAY, M. et HEIBLOEM, M. *Irrigation Water Management: Irrigation Methods. Training Manual No. 5*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Brouwer *et al.*, 1989 – BROUWER, C., PRINS, K. et HEIBLOEM, M. *Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling. Training Manual No. 4*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Brown et Mote, 2009 – BROWN, R. D. et MOTE, P. W. « The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate », *Journal of Climate*, vol. 22, p. 2124-2145.
- Brunet et Westbrook, 2012 – BRUNET, N. N. et WESTBROOK, C. J. « Wetland drainage in the Canadian prairies: Nutrient, salt and bacteria characteristics », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 146, n°1, p. 1-12.
- Bulygina *et al.*, 2009 – BULYGINA, N., MCINTYRE, N. et WHEATER, H. S. « Conditioning rainfall-runoff model parameters for ungauged catchments and land management impacts analysis », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, n°6, p. 893-904.
- Bulygina *et al.*, 2011 – BULYGINA, N., MCINTYRE, N. et WHEATER, H. S. « Bayesian conditioning of a rainfall-runoff model for predicting flows in ungauged catchments and under land use changes », *Water Resources Research*, vol. 47, n°2, W02503.
- Bulygina *et al.*, 2012 – BULYGINA, N., BALLARD, C., MCINTYRE, N., O'DONNELL, G. et WHEATER, H. « Integrating different types of information into hydrological model parameter estimation: Application to ungauged catchments and land use scenario analysis », *Water Resources Research*, vol. 48, W06519, DOI :10.1029/2011WR011207.
- Burchi *et al.*, 2009 – BURCHI, S., POPP, C., VAPNEK, J. et TUCKER, C. *Water Governance: Policy and Legal Frameworks*. Dans, *Law for Water Management: A Guide to Concepts and Effective Approaches. FAO Legislative Study*. Vapnek, J., Aylward, B., Popp, C. et Bartman, J. (édit.). Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Bureau du vérificateur général du Canada, 2010 – BUREAU DU VÉRIFICATEUR GÉNÉRAL DU CANADA. *Rapport du commissaire à l'environnement et au développement durable à la Chambre des communes. Chapitre 2, La surveillance des ressources en eau*. Ottawa (ON) : Bureau du vérificateur général du Canada.

- Bureau du vérificateur général du Canada, 2011 – BUREAU DU VÉRIFICATEUR GÉNÉRAL DU CANADA. *Rapport du commissaire à l'environnement et au développement durable. Chapitre 5, Une étude de la surveillance environnementale*. Ottawa (ON) : Bureau du vérificateur général du Canada.
- Burn *et al.*, 2010 – BURN, D. H., SHARIF, M. et ZHANG, K. « Detection of trends in hydrological extremes for Canadian watersheds », *Hydrological Processes*, vol. 24, p. 1781-1790.
- CAC, 2009 – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *La gestion durable des eaux souterraines au Canada*. Ottawa (ON) : CAC, Comité d'experts sur les eaux souterraines au Canada.
- CAC, 2011 – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *Des animaux en santé, un Canada en santé*. Ottawa (ON) : CAC, Comité d'experts sur les approches d'évaluation des risques pour la santé des animaux.
- Calvo-Bado *et al.*, 2003 – CALVO-BADO, L. A., PETTITT, T. R., PARSONS, N., PETCH, G. M., MORGAN, J. A. W. et WHIPPS, J. M. « Spatial and temporal analysis of the microbial community in slow sand filters used for treating horticultural irrigation water », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 69, n°4, p. 2116-2125.
- Camacho, 2009 – CAMACHO, A. E. « Adapting governance to climate change: Managing uncertainty through a learning infrastructure », *Emory Law Journal*, vol. 59, p. 1-78.
- Campos *et al.*, 2002 – CAMPOS, L. C., SU, M. F. J., GRAHAM, N. J. D. et SMITH, S. R. « Biomass development in slow sand filters », *Water Research*, vol. 36, n°18, p. 4543-4551.
- Canada- IPE, s.d. – CANADA-IPE. *Canada-PEI Stewardship Program*. Adresse URL : [http://www.gov.pe.ca/photos/original/af\\_cpeiasp\\_broc.pdf](http://www.gov.pe.ca/photos/original/af_cpeiasp_broc.pdf) (dernière consultation : mai 2012).
- Canada-Saskatchewan Irrigation Diversification Centre, 2007 – CANADA-SASKATCHEWAN IRRIGATION DIVERSIFICATION CENTRE. *Plastic Mulches for Commercial Vegetable Production*. Adresse URL : [http://www4.agr.gc.ca/resources/prod/doc/pfra-arap/csdc-crddi/pdf/mulches-paillis\\_eng.pdf](http://www4.agr.gc.ca/resources/prod/doc/pfra-arap/csdc-crddi/pdf/mulches-paillis_eng.pdf) (dernière consultation : juillet 2012).
- CAP2020, 2011 – CAP2020. *The Role of Agriculture in the 2011 EU Biodiversity Strategy*. Adresse URL : <http://cap2020.ieep.eu/2011/5/11/the-role-of-agriculture-in-the-2011-eu-biodiversity-strategy> (dernière consultation : avril 2012).
- Cariou *et al.*, 2009 – CARIOU, C., LENAIN, R., THUILOT, B. et BERDUCAT, M. « Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations », *Journal of Field Robotics*, vol. 26, n°6-7, p. 504-518.

- Carpenter *et al.*, 2009 – CARPENTER, S. R., MOONEY, H. A., AGARD, J., CAPISTRANO, D., DEFRIES, R. S., DÍAZ, S., . . . WHYTE, A. « Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n°5, p. 1305-1312.
- Cartmell *et al.*, 2000 – CARTMELL, E., CLARK, L., OAKES, D., SMITH, S. R. et TOMPKINS, J. A. *In Situ Bioremediation of High Nitrate Groundwater*. Article présenté dans le cadre du 7<sup>th</sup> International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Volume 2.
- Cattivelli *et al.*, 2008 – CATTIVELLI, L., RIZZA, F., BADECK, F. W., MAZZUCOTELLI, E., MASTRANGELO, A. M., FRANCA, E., . . . STANCA, A. M. « Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics », *Field Crops Research*, vol. 105, p. 1-14.
- CCME, 2006 – CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT. *Un cadre pancanadien pour la surveillance de la qualité de l'eau*. Winnipeg (MB) : CCME, Groupe de travail sur la qualité des eaux.
- CCME, 2011 – CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT. *Sélection d'outils pour l'évaluation des réseaux de surveillance de l'eau aux fins de l'adaptation aux changements climatiques*. Winnipeg (MB) : CCME.
- CCME, s.d. – CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT. *Tableau sommaire des recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*. Adresse URL : <http://st-ts.ccme.ca/?lang=fr> (dernière consultation : mai 2012).
- CE, 2010 – COMMISSION EUROPÉENNE. *Une décennie de recherche OGM commandée par l'Europe, 2001-2010* Bruxelles, Belgique : Commission Européenne, Direction général de la recherche et de l'innovation. Direction E - Biotechnologies - Agroalimentaire. E2 - Biotechnologies.
- Center for Hydrology, 2012 – CENTRE FOR HYDROLOGY. *Review of Lake Diefenbaker Operations 2010-2011. Centre for Hydrology Final Report to the Saskatchewan Watershed Authority*. Saskatoon (SK) : Centre for Hydrology, Université de la Saskatchewan.
- Cerf *et al.*, 2000 – CERF, M., GIBBON, D., HUBERT, B., ISON, R., JIGGINS, J., PAINE, M. S., . . . RÖLING, N. *Cow Up a Tree. Knowing and Learning for Change in Agriculture. Case Studies from Industrialised Countries*. INRA Editions.
- Cervoni *et al.*, 2008 – CERVONI, L., BIRO, A. et BEAZLEY, K. « Implementing integrated water resources management: The importance of cross-scale considerations and local conditions in Ontario and Nova Scotia », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 33, n°4, p. 333-350.
- Cessna *et al.*, 2010 – CESSNA, A. J., SHEEDY, C., FARENHORST, A. et MCQUEEN, D. A. R. *Pesticides*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Eilers, W., MacKay, R., Graham, L. et Lefebvre, A. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.



- Cey *et al.*, 1999 – CEY, E. E., RUDOLPH, D. L., ARAVENA, R. et PARKIN, G. « Role of the riparian zone in controlling the distribution and fate of agricultural nitrogen near a small stream in southern Ontario », *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 37, n°1-2, p. 45-67.
- Cey *et al.*, 2009 – CEY, E. E., RUDOLPH, D. L. et PASSMORE, J. « Influence of macroporosity on preferential solute and colloid transport in unsaturated field soils », *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 107, n°1-2, p. 45-57.
- Chambers *et al.*, 2001 – CHAMBERS, P., DEKIMPE, C., FOSTER, N., GOSS, M., MILLER, J. et PREPAS, E. *Effets de l'utilisation des terres pour l'agriculture et l'exploitation forestière*. Dans, *Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes aquatiques au Canada. Rapport n° 1, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE*. Burlington (ON) : Institut national de recherche sur les eaux, Environnement Canada.
- Chapagain et Hoekstra, 2008 – CHAPAGAIN, A. K. et HOEKSTRA, A. Y. « The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products », *Water International*, vol. 33, n°1, p. 19-32.
- Chen *et al.*, 2002 – CHEN, Y. R., CHAO, K. et KIM, M. S. « Machine vision technology for agricultural applications », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 36, p. 173-191.
- Chiellini *et al.*, 2008 – CHIELLINI, E., CINELLI, P., MAGNI, S., MIELE, S. et PALLA, C. « Fluid biomulching based on poly(vinyl alcohol) and fillers from renewable resources », *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 108, n°1, p. 295-301.
- Chun *et al.*, 2012 – CHUN, K. P., WHEATER, H. et ONOF, C. « Prediction of the impact of climate change on drought: An evaluation of six UK catchments using two stochastic approaches », *Hydrological Processes*, DOI : 10.1002/hyp.9259.
- Chun *et al.*, 2012 – CHUN, K. P., WHEATER, H. S. et ONOF, C. J. « Comparison of drought projections using two UK weather generators », *Hydrological Sciences Journal*, sous presse.
- Clark *et al.*, 2005 – CLARK, L. J., GOWING, D. J. G., LARK, R. M., LEEDS-HARRISON, P. B., MILLER, A. J., WELLS, D. M., . . . WHITMORE, A. P. « Sensing the physical and nutritional status of the root environment in the field: A review of progress and opportunities », *The Journal of Agricultural Science*, vol. 143, p. 347-358.

- CMI, 2008 – COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE. *The Status of Groundwater in the Great Lakes Basin*. Dans, *Priorities 2005-2007. Priorities and Progress under the Great Lakes Water Quality Agreement. Report to the International Joint Commission*. Ottawa (ON) : Commission mixte internationale, Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs.
- CNCID, 1999 – COMITÉ NATIONAL CANADIEN DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE. *Country Position Paper - Canada*. Adresse URL : [http://www.icid.org/v\\_canada.pdf](http://www.icid.org/v_canada.pdf) (dernière consultation : avril 2012).
- Cohen et Davidson, 2011 – COHEN, A. et DAVIDSON, S. « The watershed approach: Challenges, antécédents, and the transition from technical tool to governance unit », *Water Alternatives*, vol. 4, n°1, p. 1-14.
- Compagnone et al., 2009 – COMPAGNONE, C., AURICOSTE, C. et LÉMERY, B. *Conseil et développement en agriculture: Quelles nouvelles pratiques?* Dijon, France : Educagri éditions/Éditions Quae.
- Conference Board du Canada, 2011 – CONFERENCE BOARD DU CANADA. *Valuing Food: The Economic Contribution of Canada's Food Sector*. Ottawa (ON) : Conference Board du Canada.
- Connor et al., 2009 – CONNOR, R., FAURÈS, J.-M., KUYLENSTIERNA, J., MARGAT, J., STEDUTO, P., VALLÉE, D. et VAN DER HOEK, W. *Chapitre 7, Les tendances dans l'utilisation de l'eau*. Dans, *L'eau dans un monde qui change. 3<sup>e</sup> Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*. Paris, France.
- Conseil de la biodiversité de l'Ontario, 2005 – CONSEIL DE LA BIODIVERSITÉ DE L'ONTARIO. *Renouveler notre engagement – Protéger la biodiversité pour assurer l'avenir*. Peterborough (ON) : Conseil de la biodiversité de l'Ontario.
- Conseil de la biodiversité de l'Ontario, 2011 – CONSEIL DE LA BIODIVERSITÉ DE L'ONTARIO. *Stratégie de la biodiversité de l'Ontario, 2011: Renouveler notre engagement – Protéger la biodiversité pour assurer l'avenir*. Peterborough (ON) : Conseil de la biodiversité de l'Ontario.
- Conservation Ontario, 2011 – CONSERVATION ONTARIO. *Fact Sheet*. Adresse URL : [http://www.conservationontario.ca/Fact\\_sheets/CO\\_Fact\\_Sheet.pdf](http://www.conservationontario.ca/Fact_sheets/CO_Fact_Sheet.pdf) (dernière consultation : octobre 2012).
- Corburn, 2003 – CORBURN, J. « Bringing local knowledge into environmental decision making improving urban planning for communities at risk », *Journal of Planning Education and Research*, vol. 22, n°4, p. 420-433.
- Corkal et Adkins, 2008 – CORKAL, D. R. et ADKINS, P. E. *Canadian Agriculture and Water*. Article présenté dans le cadre du 13<sup>th</sup> IWRA World Water Congress. Montpellier, France.

- Corwin et Lesch, 2005a – CORWIN, D. L. et LESCH, S. M. « Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, p. 11-43.
- Corwin et Lesch, 2005b – CORWIN, D. L. et LESCH, S. M. « Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, p. 103-133.
- Cosgrove et Rijsberman, 2000a – COSGROVE, W. J. et RIJSBERMAN, F. R. *The Use of Water Today*. Dans, *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*. Londres, Royaume-Uni : Earthscan Publications Ltd., World Water Council.
- Cosgrove et Rijsberman, 2000b – COSGROVE, W. J. et RIJSBERMAN, F. R. *Vision Statement and Key Messages*. Dans, *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*. Londres, Royaume-Uni : Earthscan Publication Ltd., World Water Council.
- Costanza *et al.*, 1997 – COSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., . . . VAN DEN BELT, M. « The value of the world's ecosystem services and natural capital », *Nature*, vol. 387, n°6630, p. 253-260.
- Coulibaly et Samuel, 2011 – COULIBALY, P. et SAMUEL, J. *Evaluation of Canadian National Hydrometric Network Density vs. WMO 2008 Standards. Final Report Prepared for the Water Survey of Canada. Unpublished Report*. Hamilton (ON) : Université McMaster, Environnement Canada.
- Coumou et Rahmstorf, 2012 – COUMOU, D. et RAHMSTORF, S. « A decade of weather extremes », *Nature Climate Change*, vol. 2, p. 491-496.
- Cox *et al.*, 2004 – COX, T. S., PICONE, C. et JACKSON, W. « Research priorities in natural systems agriculture », *Journal of Crop Improvement*, vol. 12, n°1-2, p. 511-531.
- Cox *et al.*, 2010 – COX, T. S., VAN TASSEL, D. L. et COX, C. M. « Progress in breeding perennial grains », *Crop and Pasture Science*, vol. 61, n°7, p. 513-521.
- Critchley et Siegert, 1991. CRITCHLEY, W. et SIEGERT, K. *Water Harvesting A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- CSIRO, 2011 – COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION. *Seasonal and Long-Term Water Forecasting and Prediction*. Adresse URL : <http://www.csiro.au/Outcomes/Water/Water-information-systems/Seasonal-and-long-term-water-forecasting-and-prediction.aspx> (dernière consultation : avril 2012).
- Cubillo, 2010 – CUBILLO, F. « Looking for efficiency through integrated water management between agriculture and urban uses », *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 10, n°4, p. 584-590.

- Curtis et Robertson, 2003 – CURTIS, A. et ROBERTSON, A. « Understanding landholder management of river frontages: The Goulburn Broken », *Ecological Management & Restoration*, vol. 4, n°1, p. 45-54.
- DAES, 2006 – DÉPARTEMENT DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES ET SOCIALES. *Valuing and Charging for Water*. Dans, *Water. A Shared Responsibility. The United Nations World Water Development Report 2*. Oxford, Royaume-Uni : Berghahn Books.
- Dahl et Watmough, 2007 – DAHL, T. E. et WATMOUGH, M. D. « Current approaches to wetland status and trends monitoring in prairie Canada and the continental United States of America », *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 33, n°S1, p. 17-27.
- Dai *et al.*, 2004 – DAI, A., TRENBERTH, K. E. et QIAN, T. « A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming », *Journal of Hydrometeorology*, vol. 5, n°6, p. 1117-1130.
- Dai, 2011 – DAI, A. « Drought under global warming: A review », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 2, p. 45-65.
- Damalas et Eleftherohorinos, 2011 – DAMALAS, C. A. et ELEFTEROHOORINOS, I. G. « Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 8, p. 1402-1419.
- de Fraiture *et al.*, 2007 – DE FRAITURE, C., WICHELNS, D., ROCKSTRÖM, J., KEMP-BENEDICT, E., ERIYAGAMA, N., GORDON, L. J., . . . KARLBERG, L. *Looking Ahead to 2050: Scenarios of Alternative Investment Approaches*. Dans, *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Molden, D. (édit.). Londres, Royaume-Uni : Earthscan.
- de Fraiture *et al.*, 2008 – DE FRAITURE, C., GIORDANO, M. et LIAO, Y. « Biofuels and implications for agricultural water use: Blue impacts of green energy », *Water Policy*, vol. 10, n°1, p. 67-81.
- de Fraiture et Wichelns, 2010 – DE FRAITURE, C. et WICHELNS, D. « Satisfying future water demands for agriculture », *Agricultural Water Management*, vol. 97, n°4, p. 502-511.
- de Groot *et al.*, 2010 – DE GROOT, R. S., ALKEMADE, R., BRAAT, L., HEIN, L. et WILLEMEN, L. « Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making », *Ecological Complexity*, vol. 7, p. 260-272.
- de Loë *et al.*, 2001 – DE LOË, R., KREUTZWISER, R. et MORARU, L. « Adaption options for the near term: Climate change and the Canadian water sector », *Global Environmental Change*, vol. 11, p. 231-245.

- de Loë et Moraru, 2004 – DE LOË, R. et MORARU, L. C. *Water Use and Sustainability Issues in the Canadian Agriculture Sector, Final Report*. Guelph (ON) : Rob de Loë Consulting Services.
- de Loë, 2005 – DE LOË, R. *Assessment of Agricultural Water Use/Demand Across Canada, Final Report*. Guelph (ON) : Rob de Loë Consulting Services.
- de Loë et Kreutzwiser, 2007 – DE LOË, R. et KREUTZWISER, R. *Challenging the Status Quo: The Evolution of Water Governance in Canada*. Dans, *Eau Canada: The Future of Canada's Water*. Bakker, K. (édit.). Vancouver (BC) : UBC Press.
- de Loë, 2008. DE LOË, R. C. *Toward a Canadian National Water Strategy. Final Report. Prepared for the Canadian Water Resources Association*. Guelph (ON) : Rob de Loë Consulting Services.
- de Loë et al., 2009. DE LOË, R., VARGHESE, J., FERREYRA, C. et KREUTZWISER, R. *Water Allocation and Water Security in Canada: Initiating a Policy Dialogue for the 21st Century. Report Prepared for the Walter and Duncan Gordon Foundation*. Guelph (ON) : Guelph Water Management Group, Université de Guelph.
- de Loë, 2009 – DE LOË, R. C. *Managing Water Shortages for Ontario Agriculture*. Guelph (ON) : Préparé pour OMAFRA, Rob de Loë Consulting Services.
- de Wilde et al., 2007 – DE WILDE, T., SPANOGHE, P., DEBAER, C., RYCKEBOER, J., SPRINGAEL, D. et JAEKEN, P. « Overview of on-farm bioremediation systems to reduce the occurrence of point source contamination », *Pest Management Science*, vol. 63, n°2, p. 111-128.
- DEFRA, 2001 – DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS. *Groundwater Protection Code. Use and Disposal of Sheep Dip Compounds*. Londre, Royaume-Uni : DEFRA.
- Dehaan et Taylor, 2002 – DEHAAN, R. L. et TAYLOR, G. R. « Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization », *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, p. 406-417.
- Derksen et al., 2002 – DERKSEN, D. A., ANDERSON, R. L., BLACKSHAW, R. E. et MAXWELL, B. « Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the northern Great Plains », *Agronomy Journal*, vol. 94, n°2, p. 174-185.
- Déry et al., 2009 – DÉRY, S. J., STAHL, K., MOORE, R. D., WHITFIELD, P. H., MENOUNOS, B. et BURFORD, J. E. « Detection of runoff timing changes in pluvial, nival, and glacial rivers of western Canada », *Water Resources Research*, vol. 45, n°4, W04426.
- Detenbeck et al., 2002 – DETENBECK, N. E., ELONEN, C. M., TAYLOR, D. L., COTTER, A. M., PUGLISI, F. A. et SANVILLE, W. D. « Effects of agricultural activities and best management practices on water quality of seasonal prairie pothole wetlands », *Wetlands Ecology and Management*, vol. 10, n°4, p. 335-354.

- Deutsch *et al.*, 2007 – DEUTSCH, L., GRÄSLUND, S., FOLKE, C., TROELL, M., HUITRIC, M., KAUTSKY, N. et LEBEL, L. « Feeding aquaculture growth through globalization: Exploitation of marine ecosystems for fishmeal », *Global Environmental Change*, vol. 17, n°2, p. 238-249.
- Díaz *et al.*, 2010 – DÍAZ, F. J., O'GEEN, A. T. et DAHLGREN, R. A. « Efficacy of constructed wetlands for removal of bacterial contamination from agricultural return flows », *Agricultural Water Management*, vol. 97, n°11, p. 1813-1821.
- Díaz *et al.*, 2011 – DÍAZ, S. E., PÉREZ, J. C., MATEOS, A. C., MARINESCU, M. C. et GUERRA, B. B. « A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 76, n°2, p. 252-265.
- Dick *et al.*, 2010 – DICK, S., LOEWEN, C. et BARNES, W. *Project MLMMI 2008-01-30: Applying Manure to Defined Management Zones Using Precision Farming Techniques (Demonstration Project)*. Niverville (MB) : Agra-Gold Consulting Ltd., Farmers Edge Precision Consulting Inc.
- Dornes *et al.*, 2008 – DORNES, P. F., POMEROY, J. W., PIETRONIRO, A., CAREY, S. K. et QUINTON, W. L. « Influence of landscape aggregation in modelling snow-cover ablation and snowmelt runoff in a sub-arctic mountainous environment », *Hydrological Sciences Journal*, vol. 53, n°4, p. 725-740.
- Drury *et al.*, 2010. DRURY, C. F., YANG, J., DE JONG, R., HUFFMAN, T., YANG, X., REID, K. et CAMPBELL, C. A. *Azote*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Eilers, W., MacKay, R., Graham, L. et Lefebvre, A. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Dryden-Cripton *et al.*, 2009 – DRYDEN-CRIPTON, S., SMITHERS, J. A., DE LOË, R. C. et KREUTZWISER, R. D. *An Evaluation of Options for Responding to Agricultural Droughts and Water Shortages in Canada. Préparé pour Ressources naturelles Canada, Programme sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques*. Guelph (ON) : Guelph Water Management Group.
- Dumanski *et al.*, 2006 – DUMANSKI, J., PEIRETTI, R., BENITES, J. R., MCGARRY, D. et PIERI, C. « The paradigm of conservation agriculture », *Proceedings of World Association of Soil and Water Conservation*, P1, p. 58-64.
- Dunbar, 2010 – DUNBAR, J. *Synthetic Biology Opportunities in Agriculture*. Adresse URL : [http://sysos.eng.ox.ac.uk/control/RoSBNNet/images/c/c1/Rosbnet\\_SDunbar.pdf](http://sysos.eng.ox.ac.uk/control/RoSBNNet/images/c/c1/Rosbnet_SDunbar.pdf) (dernière consultation : août 2012).
- Dunne *et al.*, 2005 – DUNNE, E. J., CULLETON, N., O'DONOVAN, G., HARRINGTON, R. et OLSEN, A. E. « An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water », *Ecological Engineering*, vol. 24, n°3, p. 219-232.

- Dupont, 2010 – DUPONT, D. P. « Cost-sharing incentive programs for source water protection: The Grand River's Rural Water Quality Program », *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, vol. 58, n°4, p. 481-496.
- Dursun et Ozden, 2011 – DURSUN, M. et OZDEN, S. « A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors », *Scientific Research and Essays*, vol. 6, n°7, p. 1573-1582.
- Easton *et al.*, 2008 – EASTON, Z. M., WALTER, M. T. et STEENHUIS, T. S. « Combined monitoring and modeling indicate the most effective agricultural best management practices », *Journal of Environmental Quality*, vol. 37, n°5, p. 1798-1809.
- Edge *et al.*, 2012 – EDGE, T. A., EL-SHAARAWI, A., GANNON, V., JOKINEN, C., KENT, R., KHAN, I. U. H., . . . VAN BOCHOVE, E. « Investigation of an *Escherichia coli* environmental benchmark for waterborne pathogens in agricultural watersheds in Canada », *Journal of Environmental Quality*, vol. 41, n°1, p. 21-30.
- Eilers et Huffman, 2005 – EILERS, W. et HUFFMAN, T. *Changement de l'utilisation des terres agricoles*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 2*. Lefebvre, A., Eilers, W. et Chunn, B. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture and Agroalimentaire Canada.
- Eilers *et al.*, 2010 – EILERS, W., MACKAY, R., GRAHAM, L. et LEFEBVRE A. (édit.). *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Elissade *et al.*, 2010 – ELISSADE, J., GAUDET, J. et RENAUD, L. « Circulation des connaissances : Modèle et stratégies », *Revue Internationale Communication Sociale et Publique*, vol. 3-4, p. 135-149.
- Elliott et Efetha, 1999 – ELLIOTT, J. A. et EFETHA, A. A. « Influence of tillage and cropping system on soil organic matter, structure and infiltration in a rolling landscape », *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 79, p. 457-463.
- Ellis *et al.*, 2003 – ELLIS, J. B., SHUTES, R. B. E. et REVITT, D. M. *Guidance Manual for Constructed Wetlands. R&D Technical Report P2-159/TR2*. Bristol, Royaume-Uni : Environment Agency.
- Entz *et al.*, 2002 – ENTZ, M. H., SCHOofs, A., HUMBLE, S. M., HOEPPNER, J., HOLLIDAY, N. J., MOULIN, A., . . . THOMPSON, R. *Glenlea Long-Term Crop Rotation Study: A Comparison of Organic and Conventional Systems*. Article présenté dans le cadre du 14<sup>th</sup> IFOAM Organic World Congress. Victoria (BC)
- Environment Agency, 2003 – ENVIRONMENT AGENCY. *Agricultural Waste Survey 2003. A Study of the Management of Non-Natural Agricultural Waste on Farms*. Bristol, Royaume-Uni : Environment Agency.
- Environnement Canada, 1987 – ENVIRONNEMENT CANADA. *Politique fédérale relative aux eaux*. Ottawa (ON) : Environnement Canada.

- Environnement Canada, 2004 – ENVIRONNEMENT CANADA. *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE n° 3 et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC n° 1*. Burlington (ON) : Institut national de recherche scientifique, Environnement Canada.
- Environnement Canada et Santé Canada, 2009 – ENVIRONNEMENT CANADA et SANTÉ CANADA. *Évaluation préalable pour le Défi concernant le Acrylamide. Numéro de registre du Chemical Abstracts Service 79-06-1*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/ese-ees/default.asp?lang=Fr&xml=FF4FCD6E-B330-7266-D1FD-B44C48A6BC9B> (dernière consultation : juillet 2012).
- Environnement Canada, 2010a – ENVIRONNEMENT CANADA. *L'eutrophication*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/air/default.asp?lang=Fr&n=64CD2186-1> (dernière consultation : mai 2012).
- Environnement Canada, 2010b – ENVIRONNEMENT CANADA. *Trouver l'équilibre entre l'agriculture et l'environnement. Initiative nationale d'élaboration de normes agroenvironnementales (INENA)*. Ottawa (ON) : Environnement Canada.
- Environnement Canada, 2010c – ENVIRONNEMENT CANADA. *Introduction à l'utilisation de l'eau*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=2AE761EC-1> (dernière consultation : avril 2012).
- Environnement Canada, 2010d – ENVIRONNEMENT CANADA. *Les responsabilités partagées*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=035F6173-1> (dernière consultation : avril 2012).
- Environnement Canada, 2010e – ENVIRONNEMENT CANADA. *Surveillance de la qualité de l'eau*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/qualitedeleau-waterquality/default.asp?lang=Fr&n=0DF8E8D2-1> (dernière consultation : avril 2012).
- Environnement Canada et Ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2011 – ENVIRONNEMENT CANADA et MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ONTARIO. *Accord Canada-Ontario. Concernant l'écosystème du bassin des Grands Lacs. 2007-2010 Rapport d'étape*. Ottawa (ON) : Environnement Canada et ministère de l'Environnement de l'Ontario.
- Environnement Canada, 2011a – ENVIRONNEMENT CANADA. *Utilisation sur place*. Adresse URL : <http://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=BCC55AC6-1> (dernière consultation : avril 2012).
- Environnement Canada, 2011b – ENVIRONNEMENT CANADA. *Présence et concentrations des pesticides prioritaires dans certains écosystèmes aquatiques canadiens*. Ottawa (ON) : Direction des sciences et de la technologie de l'eau, Environnement Canada.
- Environnement Canada, 2011c – ENVIRONNEMENT CANADA. *Législation et gouvernance de l'eau. Provinciales/Territoriales*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=24C5BD18-1> (dernière consultation : avril 2012).



- Environnement Canada, 2011d – ENVIRONNEMENT CANADA. *État et tendances de la qualité de l'eau pour les nutriments dans les bassins versants importants du Canada. Sommaire technique*. Ottawa (ON) : Direction des sciences et de la technologie de l'eau, Environnement Canada.
- Environnement Canada, 2011e – ENVIRONNEMENT CANADA. *Où nous surveillons*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/eaudouce-freshwater/default.asp?lang=Fr&n=8C9B7D0C-1> (dernière consultation : avril 2012).
- Environnement Canada, 2011f – ENVIRONNEMENT CANADA. *Utilisations par prélèvement*. Adresse URL : <http://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=851B096C-1> (dernière consultation : avril 2012).
- Environnement Canada, 2011g – ENVIRONNEMENT CANADA. *La disponibilité de l'eau au Canada*. Adresse <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=1B1433B4-1> (dernière consultation: novembre 2012).
- Environnement Canada, 2012a – ENVIRONNEMENT CANADA. *L'agriculture et la météo*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=136568DB-1> (dernière consultation : juin 2012).
- Environnement Canada, 2012b – ENVIRONNEMENT CANADA. *La législation et les politiques fédérales*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=E05A7F81-1> (dernière consultation : avril 2012).
- Environnement Canada, 2012c – ENVIRONNEMENT CANADA. *Impacts de l'utilisation du sol sur la qualité de l'eau douce*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=88872F95-1> (dernière consultation : juin 2012).
- EPA, 2010 – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Dissolved Oxygen Depletion in Lake Erie*. Adresse URL : <http://www.epa.gov/g indicators/water/oxygenb.html> (dernière consultation : avril 2012).
- EPA, 2011 – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Reactive Nitrogen in the United States: An Analysis of Inputs, Flows, Consequences, and Management Options. A Report of the EPA Science Advisory Board*. Washington (DC) : U.S. EPA.
- EPA, 2012 – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *What is the Conventional Reduced Risk Pesticide Program?* Adresse URL : <http://www.epa.gov/oppr001/workplan/reducedrisk.html> (dernière consultation : avril 2012).
- EPBH, 2010 – ÉVALUATION DES PRATIQUES DE GESTION BÉNÉFIQUES À L'ÉCHELLE DES BASSINS HYDROGRAPHIQUES. *Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH) : pour une planification améliorée du paysage agricole. Examen quadriennal (2004/5 - 2007/8)*. Ottawa (ON) : EPBH, Agriculture et Agroalimentaire Canada.

- Ergas *et al.*, 2010 – ERGAS, S. J., SENGUPTA, S., SIEGEL, R., PANDIT, A., YAO, Y. F. et YUAN, X. « Performance of nitrogen-removing bioretention systems for control of agricultural runoff », *Journal of Environmental Engineering*, vol. 136, p. 1105-1112.
- Estrin *et al.*, 2003 – ESTRIN, D., MICHENER, W. et BONITO, G. *Environmental cyberinfrastructure needs for distributed sensor networks: A report from a National Science Foundation sponsored workshop*. La Jolla (CA) : Scripps Institute of Oceanography.
- Evrard *et al.*, 2007 – EVRARD, O., PERSOONS, E., VANDAELE, K. et VAN WESEMAEL, B. « Effectiveness of erosion mitigation measures to prevent muddy floods: A case study in the Belgian loam belt », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 118, n°1-4, p. 149-158.
- Exall *et al.*, 2006. EXALL, K., MARSALEK, J. et SCHAEFER, K. « Water reuse in Canada: Opportunities and challenges », *Integrated Urban Water Resources Management, NATO Security Through Science Series*, p. 253-262.
- Fageria *et al.*, 2008 – FAGERIA, N. K., BALIGAR, V. C. et LI, Y. C. « The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century », *Journal of Plant Nutrition*, vol. 31, n°6, p. 1121-1157.
- Falkenmark *et al.*, 2007 – FALKENMARK, M., FINLAYSON, C. M. et GORDON, L. J. *Agriculture, Water, and Ecosystems: Avoiding the Costs of Going too Far*. Dans, *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Molden, D. (édit.). Londres, Royaume-Uni : Earthscan.
- Fang *et al.*, 2010 – FANG, X., POMEROY, J. W., WESTBROOK, C. J., GUO, X., MINKE, A. G. et BROWN, T. « Prediction of snowmelt derived streamflow in a wetland dominated prairie basin », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, n°6, p. 991-1006.
- FAO *et al.*, 2011 – FAO, IFAD, IMF, OECD, UNCTAD, WFP, . . . UNHCTF. *Price Volatility in Food and Agricultural Markets: Policy Responses*. Réponses politiques avec la contribution de FAO, IFAD, IMF, OECD, UNCTAD, WFP, the World Bank, the WTO, IFPRI, and the UN HCTF.
- FAO, 2007 – ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. *FertiStat. Statistiques sur l'utilisation des engrais*. Adresse URL : [http://www.fao.org/ag/agp/fertistat/fst\\_fubc\\_fr.asp](http://www.fao.org/ag/agp/fertistat/fst_fubc_fr.asp) (dernière consultation : mai 2012).
- FAO, 2008 – ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. *Climate Change, Water, and Food Security*. Rome, Italie : FAO Waters Reports 36, FAO.

- FAO, 2009 – ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. *Eradicating Hunger and Pushing Economic and Social Growth*. Rome, Italie : FAO.
- Farber *et al.*, 2006 – FARBER, S., COSTANZA, R., CHILDERS, D. L., ERICKSON, J., GROSS, K., GROVE, M., . . . TROY, A. « Linking ecology and economics for ecosystem management », *BioScience*, vol. 56, n°2, p. 117-129.
- Faulkner, 2010 – FAULKNER, H. « Muddy floods: Challenges for the future », *Land Degradation & Development*, vol. 21, n°4, p. 406-411.
- Faurès *et al.*, 2007 – FAURÈS, J.-M., SVEDSEN, M. et TURRAL, H. *Reinventing Irrigation*. Dans, *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Molden, D. (édit.). Londres, Royaume-Uni : Earthscan.
- Feder *et al.*, 2001 – FEDER, G., WILLETT, A. et ZIJP, W. *Agricultural Extension: Generic Challenges and Some Ingredients for Solutions*. Dans, *Knowledge Generation and Technical Change: Institutional Innovation in Agriculture*. Wolf, S. et Ziberman, D. (édit.). Boston (MA) : Kluwer.
- Ferreyra *et al.*, 2008 – FERREYRA, C., DE LOË, R. C. et KREUTZWISER, R. D. « Imagined communities, contested watersheds: Challenges to integrated water resources management in agricultural areas », *Journal of Rural Studies*, vol. 24, n°3, p. 304-321.
- Financement agricole Canada, 2011 – FINANCEMENT AGRICOLE CANADA. *Optimisme au sein de l'agriculture canadienne*. Regina (SK) : Financement agricole Canada.
- Findlay et Telford, 2006 – FINDLAY, R. et TELFORD, P. *North American Linkages. The International Joint Commission and the Great Lakes Water Quality Agreement. Lessons for Canada-United States Regulatory Co-operation. Working Paper Series 023*. Ottawa (ON) : Projet de recherche sur les politiques, Gouvernement du Canada.
- Fisher *et al.*, 2005 – FISCHER, G., SHAH, M., TUBIELLO, F. N. et VAN VELHUIZEN, H. « Socio-economic and climate change impacts on agriculture: An integrated assessment, 1990–2080 », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 360, p. 2067-2083.
- Fish *et al.*, 2010 – FISH, R. D., IORIS, A. A. R. et WATSON, N. M. « Integrating water and agricultural management: Collaborative governance for a complex policy problem », *Science of the Total Environment*, vol. 408, n°23, p. 5623-5630.
- Flörke et Eisner, 2011 – FLÖRKE, M. et EISNER, S. *The Development of Global Spatially Detailed Estimates of Sectoral Water Requirements, Past, Present and Future, Including Discussion of the Main Uncertainties, Risks and Vulnerabilities of Human Water Demand*. EU Watch, Technical Report No. 46.

- Foley *et al.*, 2005 – FOLEY, J. A., DEFRIES, R., ASNER, G. P., BARFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, S. R., . . . SNYDER, P. K. « Global consequences of land use », *Science*, vol. 309, p. 570-574.
- Foley, 2011 – FOLEY, J. A. « Can we feed the World & sustain the Planet? », *Scientific American*, vol. 305, n°5, p. 60-65.
- Foley *et al.*, 2011 – FOLEY, J. A., RAMANKUTTY, N., BRAUMAN, K. A., CASSIDY, E. S., GERBER, J. S., JOHNSTON, M., . . . ZAKS, D. P. M. « Solutions for a cultivated planet », *Nature*, vol. 478, p. 337-342.
- Folke *et al.*, 2005 – FOLKE, C., HAHN, T., OLSSON, P. et NORBERG, J. « Adaptive governance of social-ecological systems », *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 30, p. 441-473.
- Fondation de la faune du Québec et Union des producteurs agricoles, 2011 – FONDATION DE LA FAUNE DU QUÉBEC et UNION DES PRODUCTEURS AGRICOLES. *Le manuel d'accompagnement pour la mise en valeur de la biodiversité des cours d'eau en milieu agricole*. Adresse URL : <http://www.coursdeauagricoles.ca/> (dernière consultation : avril 2012).
- Foresight, 2011 – FORESIGHT. *The Future of Food and Farming: Challenges and Choices for Global Sustainability. Final Project Report*. Londres, Royaume-Uni : The Government Office for Science.
- Fowler, 2002 – FOWLER, D. B. *Chapter 2, Conservation and Winter Wheat Development*. Adresse URL : [http://www.usask.ca/agriculture/plantsci/winter\\_cereals/Winter\\_wheat/CHAPT02/cvchpt02.php](http://www.usask.ca/agriculture/plantsci/winter_cereals/Winter_wheat/CHAPT02/cvchpt02.php) (dernière consultation : avril 2012).
- Frey *et al.*, 2012 – FREY, S. K., RUDOLPH, D. L., LAPEN, D. R. et COELHO, B. R. B. « Viscosity dependant dual-permeability modelling of liquid manure movement in layered, macroporous, tile drained soil », *Water Resource Research* vol. 48, n°11, DOI : 1029-2011WR010809.
- Frontier Economics, 2008 – FRONTIER ECONOMICS. *The Concept of 'Virtual Water' - A Critical Review. A report Prepared for the Victorian Department of Primary Industries*. Melbourne, Australie : Frontier Economics Pty Ltd.
- Funk et Robert, 2003 – FUNK, T. L. et ROBERT, M. J. *Variable Rate Manure Spreader: Technology to Validate a Nutrient Management Plan. SOWN Papers*. Champaign (IL) : SOWN (Swine Odor and Waste Management)
- Gallai *et al.*, 2009 – GALLAI, N., SALLES, J.-M., SETTELE, J. et VAISSIÈRE, B. E. « Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline », *Ecological Economics*, vol. 68, n°3, p. 810-821.
- Gallivan *et al.*, 2001 – GALLIVAN, G. J., SURGEONER, G. A. et KOVACH, J. « Pesticide risk reduction on crops in the province of Ontario », *Journal of Environmental Quality*, vol. 30, p. 798-813.

- Galzki *et al.*, 2011 – GALZKI, J. C., BIRR, A. S. et MULLA, D. J. « Identifying critical agricultural areas with three-meter LiDAR elevation data for precision conservation », *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 66, n°6, p. 423-430.
- Garthwaite, 2004 – GARTHWAITE, D. *A Survey of Current Farm Sprayer Practices in the United Kingdom 2004*. York, Royaume-Uni : Central Science Laboratory.
- Grenier *et al.*, 2008 – GENIER, C., STAMP, M. et PFITZER, M. *Corporate Social Responsibility in the Agri-Food Sector: Harnessing Innovation for Sustainable Development*. Wasington (DC) : FSG Social Impact Advisors. Préparé pour la FAO.
- GIEC, 2007 – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. *Changements climatiques 2007. Rapport de synthèse*. Valence, Espagne : GIEC.
- Gierczak *et al.*, 2007 – GIERCZAK, R., DEVLIN, J. F. et RUDOLPH, D. L. « Field test of a cross-injection scheme for stimulating *in situ* denitrification near a municipal water supply well », *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 89, n°1-2, p. 48-70.
- Gifford *et al.*, 2008a – GIFFORD, M., MCCALLA, A. F. et MEILKE, K. D. « The Doha round and agrifood: A question of political will », *Policy Options*, vol. 29, n°8, p. 35-38.
- Gifford *et al.*, 2008b – GIFFORD, M., MCCALLA, A. F. et MEILKE, K. D. *What if the Doha Round Fails?: Implications for Canadian Agriculture. CATPRN Commissioned Paper CP 2008-01*. Canadian Agricultural Trade Policy Research Network.
- Gilbert et Morgan, 2010 – GILBERT, C. L. et MORGAN, C. W. « Food price volatility », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, n°1554, p. 3023-3034.
- Gitau *et al.*, 2005 – GITAU, M. W., GBUREK, W. J. et JARRETT, A. R. « A tool for estimating best management practice effectiveness for phosphorus pollution control », *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 60, n°1, p. 1-10.
- Global Water Partnership, 2002 – GLOBAL WATER PARTNERSHIP. *Dialogue on Effective Water Governance. Update 2002*. Stockholm, Suède : Global Water Partnership.
- Glozier *et al.*, 2012 – GLOZIER, N. E., STRUGER, J., CESSNA, A. J., GLEDHILL, M., RONDEAU, M., ERNST, W. R., . . . DONALD, D. B. « Occurrence of glyphosate and acidic herbicides in select urban rivers and streams in Canada, 2007 », *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 19, p. 821-834.
- Godfray *et al.*, 2010 – GODFRAY, H. C. J., CRUTE, I. R., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J. F., NISBETT, N., . . . WHITELEY, R. « The future of the global food system », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, p. 2769-2777.

- Godfrey et Wood, 2003 – GODFREY, J. et WOOD, H. « The consumer's perception of agriculture and how we can influence it. », *Journal of the Royal Agricultural Society of England*, vol. 164, p. 1-10.
- Godwin et Miner, 1996 – GODWIN, D. C. et MINER, J. R. « The potential of off-stream livestock watering to reduce water quality impacts », *Bioresource Technology*, vol. 58, n°3, p. 285-290.
- Golding et Dong, 2010 – GOLDING, A.-L. et DONG, Z. « Hydrogen production by nitrogenase as a potential crop rotation benefit », *Environmental Chemistry Letters*, vol. 8, n°2, p. 101-121.
- Gordon *et al.*, 2008 – GORDON, L. J., PETERSON, G. D. et BENNETT, E. M. « Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises », *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 23, n°4, p. 211-219.
- Gornall *et al.*, 2010 – GORNALL, J., BETTS, R., BURKE, E., CLARK, R., CAMP, J., WILLETT, K. et WILTSHIRE, A. « Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, n°1554, p. 2973-2989.
- Goss et Barry, 1995 – GOSS, M. J. et BARRY, D. A. J. « Groundwater quality: Responsible agriculture and public perceptions », *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, vol. 8, n°1, p. 52-64.
- Goss *et al.*, 1998 – GOSS, M. J., BARRY, D. A. J. et RUDOLPH, D. L. « Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture: 1. Results from drinking water wells », *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 32, n°3, p. 267-293.
- Goss et Richards, 2008 – GOSS, M. et RICHARDS, C. « Development of a risk-based index for source water protection planning, which supports the reduction of pathogens from agricultural activity entering water resources », *Journal of Environmental Management*, vol. 87, n°4, p. 623-632.
- Gottschall *et al.*, 2007 – GOTTSCHALL, N., BOUTIN, C., CROLLA, A., KINSLEY, C. et CHAMPAGNE, P. « The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada », *Ecological Engineering*, vol. 29, n°2, p. 154-163.
- Gouvernement Australien, 2010 – GOUVERNEMENT AUSTRALIEN. *Annual Report of the Commonwealth Environmental Water Holder 2009–10*. Canberra, Australie : Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts.

- Gouvernement Australien, 2011a – GOUVERNEMENT AUSTRALIEN. *Australian Drinking Water Guidelines 6. National Water Quality Management Strategy*. Canberra, Australie : National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council, Commonwealth of Australia.
- Gouvernement Australien, 2011b – GOUVERNEMENT AUSTRALIEN. *Australian Water Markets Report 2010-2011*. Canberra, Australie : National Water Commission, Commonwealth of Australia.
- Gouvernement Australien, 2012 – GOUVERNEMENT AUSTRALIEN. *Restoring the Balance in the Murray-Darling Basin*. Adresse URL : <http://www.environment.gov.au/water/publications/mdb/restoring-balance.html> (dernière consultation : août 2012).
- Gouvernement de la Saskatchewan, 2008 – GOUVERNEMENT DE LA SASKATCHEWAN. *Lake Diefenbaker Development Area*. Adresse URL : <http://www.agriculture.gov.sk.ca/Default.aspx?DN=9a3dbb08-1ece-45a2-ae2e-570ba5b479ad> (dernière consultation : juin 2012).
- Gouvernement de l'Alberta, 2005 – GOUVERNEMENT DE L'ALBERTA. *South Saskatchewan River Basin Water Management Plan Scenario Modelling Information*. Adresse URL : <http://www3.gov.ab.ca/env/water/regions/ssrb/wrmmoutput/index.asp> (dernière consultation : juillet 2012).
- Gouvernement de l'Alberta, 2011 – GOUVERNEMENT DE L'ALBERTA. *Agriculture and Water Quality: Beneficial Management Practice (BMP) Resources*. Adresse URL : [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/aesa5826](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/aesa5826) (dernière consultation : avril 2012).
- Gouvernement de l'Alberta, s.d. – GOUVERNEMENT DE L'ALBERTA. *Water for Life: Alberta's Strategy for Sustainability, 2003*. Adresse URL : <http://www.waterforlife.alberta.ca/0918.html> (dernière consultation : avril 2012).
- Gouvernement du Manitoba, s.d. – GOUVERNEMENT DU MANITOBA. *Alternative Land Use Services*. Adresse URL : <http://www.gov.mb.ca/agriculture/soilwater/ecological/feg01s00.html> (dernière consultation : avril 2012).
- Govender *et al.*, 2009 – GOVENDER, M., DYE, P. J., WEIERSBYE, I. M., WITKOWSKI, E. T. F. et AHMED, F. « Review of commonly used remote sensing and ground-based technologies to measure plant water stress », *Water SA*, vol. 35, n°5, p. 741-752.
- Grafton *et al.*, 2009 – GRAFTON, R. Q., LANDRY, C., LIBECAP, G. D. et O'BRIEN, J. R. *Water Markets: Australia's Murray-Darling Basin and the US Southwest. Working Paper No. 15/2009*. Australie : International Centre for Economic Research.

- Gray, 1970 – GRAY, D. M. *Handbook on the Principles of Hydrology: with Special Emphasis Directed to Canadian Conditions in the Discussions, Applications, and Presentation of Data*. Port Washington (NY) : Water Information Center, Inc.
- Gray et al., 2001 – GRAY, D. M., TOTH, B., ZHAO, L., POMEROY, J. W. et GRANGER, R. J. « Estimating areal snowmelt infiltration into frozen soils », *Hydrological Processes*, vol. 15, n°16, p. 3095-3111.
- Greenwood et al., 2010 – GREENWOOD, D. J., ZHANG, K., HILTON, H. W. et THOMPSON, A. J. « Opportunities for improving irrigation efficiency with quantitative models, soil water sensors and wireless technology », *The Journal of Agricultural Science*, vol. 148, n°1, p. 1-16.
- Gregoire et al., 2009 – GREGOIRE, C., ELSAESSER, D., HUGUENOT, D., LANGE, J., LEBEAU, T., MERLI, A., . . . SCHÜTZ, T. « Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems - A review », *Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms*, vol. 2, p. 293-338.
- Grisso et al., 2011 – GRISSO, R. B., ALLEY, M., THOMASON, W., HOLSHOUSER, D. et ROBERSON, G. T. *Precision Farming Tools: Variable-Rate Application. Publication 442-505*. Blacksburg (VA) : Virginia Cooperative Extension, Université d'état de la Virginie.
- Hadjigeorgalis, 2009 – HADJIGEORGALIS, E. « A place for water markets: Performance and challenges », *Applied Economic Perspectives and Policy*, vol. 31, n°1, p. 50-67.
- Halliday et Faveri, 2007 – HALLIDAY, R. et FAVERI, G. « The St. Mary and Milk rivers: The 1921 order revisited », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 32, n°1, p. 75-92.
- Hamdy et al., 2003 – HAMDY, A., RAGAB, R. et SCARASCIA-MUGNOZZA, E. « Coping with water scarcity: Water saving and increasing water productivity », *Irrigation and Drainage*, vol. 52, n°1, p. 3-20.
- Harker et al., 2000 – HARKER, D. B., CHAMBERS, P. A., CROWE, A. S., FAIRCHILD, G. L. et KIENHOLZ, E. *La qualité de l'eau*. Dans, *La santé de l'eau. Vers une agriculture durable au Canada*. Coote, D. R. et Gregorich, L. J. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.
- Harker et al., 2004 – HARKER, B., LEBEDIN, J., GOSS, M. J., MADRAMOOTOO, C., NELSON, D., PATERSON, B. et VAN DER GULIK, T. *Pratiques et changements concernant l'aménagement du sol - Agriculture*. Dans, *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE n° 3 et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC n° 1*. Burlington (ON) : Institut national de recherche scientifique, Environnement Canada.



- Hart *et al.*, 2012 – HART, W. E., GLOVER, F. S., YODER, D. C. et MUELLER, T. C. « Full-scale development and testing of a system to manage pesticide-contaminated wastewater », *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 28, n°3, p. 401-406.
- Harto *et al.*, 2010 – HARTO, C., MEYERS, R. et WILLIAMS, E. « Life cycle water use of low-carbon transport fuels », *Energy Policy*, vol. 38, n°9, p. 4933-4944.
- Haslauer *et al.*, 2004 – HASLAUER, C. P., RUDOLPH, D. L. et THOMPSON, N. R. *An Investigative Framework for Assessing the Impact of Changes in Agricultural Land-Use Practices on Municipal Groundwater Quality: The Woodstock Case*. Article présenté dans le cadre du 4<sup>th</sup> Annual Joint International Association of Hydrogeologists (IAH) and Canadian Geotechnology Society (CGS) and Canadian Geotechnolgy Society Conference. Québec (QC).
- Hatch *et al.*, 2002 – HATCH, D., GOULDING, K. et MURPHY, D. *NITROGEN*. Dans, *Agriculture, Hydrology and Water Quality*. Haygarth, P. M. et Jarvis, S. C. (édit.). New York (NY) : CABI Publishing.
- Hayes *et al.*, 2009 – HAYES, B. J., BOWMAN, P. J., CHAMBERLAIN, A. J. et GODDARD, M. E. « Invited review: Genomic selection in dairy cattle: Progress and challenges », *Journal of Dairy Science*, vol. 92, p. 433-443.
- Hayman et Maaskant, 1994 – HAYMAN, D. et MAASKANT, K. *Environmental Monitoring of Agricultural Constructed Wetlands - A Provincial Study*. London (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada, Pest Management Research Centre.
- Heady et Fan, 2008 – HEADY, D. et FAN, S. *Anatomy of a Crisis. The Causes and Consequences of Surging Food Prices. IFPRI Discussion Paper 00831*. Washington (DC) : International Food Policy Research Institute, Development Strategy and Governance Division.
- Heal *et al.*, 2004 – HEAL, K. V., SMITH, K. A., YOUNGER, P. L., MCHAFFIE, H. et BAITTY, L. C. *Removing Phosphorus from Sewage Effluent and Agricultural Runoff Using Recovered Ochre*. Dans, *Phosphorus in Environmental Technologies: Principles and Applications*. Valsami-Jones, E. (édit.). Londre, Royaume-Uni : IWA Publishing.
- Hecker *et al.*, 2012 – HECKER, M., KHIM, J. S., GIESY, J. P., LI, S. Q. et RYU, J. H. « Seasonal dynamics of nutrient loading and chlorophyll A in a northern Prairies reservoir, Saskatchewan, Canada », *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 4, n°4, p. 180-202.
- Hess *et al.*, 2012 – HESS, J. J., MCDOWELL, J. Z. et LUBER, G. « Integrating climate change adaptation into public health practice: Using adaptive management to increase adaptive capacity and build resilience », *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, n°2, p. 171-179.

- Hewitt, 2010 – HEWITT, J. *GMO Policy in Australia*. Dans, *Policy Responses to Societal Concerns in Food and Agriculture. Proceedings of an OECD Workshop*. Paris, France : OCDE.
- Hickey et Doran, 2004 – HICKEY, M. B. C. et DORAN, B. « A review of the efficiency of buffer strips for the maintenance and enhancement of riparian ecosystems », *Water Quality Research Journal of Canada*, vol. 39, n°3, p. 311-317.
- Hill et al., 2008 – HILL, C., FURLONG, K., BAKKER, K. et COHEN, A. « Harmonization versus subsidiarity in water governance: A review of water governance and legislation in the Canadian provinces and territories », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 33, n°4, p. 315-332.
- Hillel et Vlek, 2005 – HILLEL, D. et VLEK, P. « The sustainability of irrigation », *Advances in Agronomy*, vol. 87, p. 55-84.
- Hilliard et Reedyk, 2000 – HILLIARD, C. et REEDYK, S. *Agricultural Best Management Practices*. Outlook (SK) : Prairie Farm Rehabilitation Administration.
- Hirji et Davis, 2009 – HIRJI, R. et DAVIS, R. *Environmental Flows in Water Resources Policies, Plans, and Projects: Findings and Recommendations*. Washington (DC) : Banque internationale pour la reconstruction et le développement, Banque Mondiale.
- Hoekstra et Hung, 2002 – HOEKSTRA, A. Y. et HUNG, P. Q. *Virtual Water Trade. A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade. Research Report Series No. 11*. Delft, Pays-Bas : IHE Delft.
- Hoepfner et al., 2006 – HOEPPNER, J. W., ENTZ, M. H., MCCONKEY, B. G., ZENTNER, R. P. et NAGY, C. N. « Energy use and efficiency in two Canadian organic and conventional crop production systems », *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 21, n°1, p. 60-67.
- Hoogeveen et al., 2009 – HOOGEVEEN, J., FAURÈS, J.-M. et VAN DE GIESSEN, N. « Increased biofuel production in the coming decade: To what extent will it affect global freshwater resources? », *Irrigation and Drainage*, vol. 58, n°S1, p. S148-S160.
- Hoover et al., 2007 – HOOVER, G., HOWATSON, A., CHURCHILL, J. et ROBERTS, J. *Naviguer en eaux troubles : Évaluation de la gouvernance de l'eau au Canada*. Ottawa (ON) : Conference Board du Canada.
- Hope, 2006 – HOPE, J. *The CFO as Architect of Adaptive Management*. Dans, *Reinventing the CFO: How Financial Managers Can Transform their Roles and Add Greater Value*. Boston (MA) : Harvard Business School Publishing.
- Horbulyk, 1995 – HORBULYK, T. M. « Integrated water management and the treatment of regulatory takings: The case of Canada's water allocation reform », *Journal of Contemporary Water Research and Education*, vol. 100, p. 48-55.

- Horbulyk, 2007 – HORBULYK, T. M. *Liquid Gold? Water Markets in Canada*. Dans, *Eau Canada. The Future of Canada's Water*. Bakker, K. (édit.). Vancouver (BC) : UBC Press.
- Howarth *et al.*, 2011 – HOWARTH, R., CHAN, F., CONLEY, D. J., GARNIER, J., DONEY, S. C., MARINO, R. et BILLEN, G. « Coupled biogeochemical cycles: Eutrophication and hypoxia in temperate estuaries and coastal marine ecosystems », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 9, n°1, p. 18-26.
- Hsiao *et al.*, 2007 – HSIAO, T. C., STEDUTO, P. et FERERES, E. « A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture », *Irrigation science*, vol. 25, p. 209-231.
- Hubbard *et al.*, 2004 – HUBBARD, R. K., NEWTON, G. L. et HILL, G. M. « Water quality and the grazing animal », *Journal of Animal Science*, vol. 82, n°13 suppl, p. E255-E263.
- Huffman et Coote, 2010 – HUFFMAN, T. et COOTE, D. *Couverture des sols*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Eilers, W., MacKay, R., Graham, L. et Lefebvre, A. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Huffman et Eilers, 2010 – HUFFMAN, T. et EILERS, W. *Utilisation des terres agricoles*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Eilers, W., MacKay, R., Graham, L. et Lefebvre, A. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Huisman et Wood, 1974 – HUISMAN, L. et WOOD, W. E. *Slow Sand Filtration*. Genève, Suisse: Organisation mondiale de la Santé.
- Hunter *et al.*, 2012 – HUNTER, P. J., CALVO-BADO, L. A., PARSONS, N. R., PETTITT, T. R., PETCH, G. M., SHAW, E., . . . WHIPPS, J. M. « Variation in microbial communities colonizing horticultural slow sand filter beds: Implications for filter function », *Irrigation science*, DOI : 10.1007/s00271-00012-00339-z.
- Hyatt *et al.*, 2010 – HYATT, C. R., VENTEREA, R. T., ROSEN, C. J., MCNEARNEY, M., WILSON, M. L. et DOLAN, M. S. « Soil carbon sequestration & greenhouse gas mitigation », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 74, n°2, p. 419-428.
- Immirzi *et al.*, 2008 – IMMIRZI, B., MALINCONICO, M., SANTAGATA, G. et TRAUTZ, D. « Characterization of Galactomannans and Cellulose Fibres Based Composites for New Mulching Spray Technology », *Acta Horticulturae (ISHS)*, vol. 801, p. 195-202.
- Immirzi *et al.*, 2009 – IMMIRZI, B., SANTAGATA, G., VOX, G. et SCHETTINI, E. « Preparation, characterisation and field-testing of a biodegradable sodium alginate-based spray mulch », *Biosystems Engineering*, vol. 102, n°4, p. 461-472.

- International Plant Nutrition Institute, 2012 – INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. *4R Plant Nutrition: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition*. Norcross (GA) : International Plant Nutrition Institute.
- Ippolito *et al.*, 2011 – IPPOLITO, J. A., BARBARICK, K. A. et ELLIOTT, H. A. « Drinking water treatment residuals: A review of recent uses », *Journal of Environmental Quality*, vol. 40, n°1, p. 1-12.
- Ipsos Reid, 2011 – IPSOS REID. *2011 Canadian Water Attitudes Study*. Toronto (ON) : Ipsos Reid, Unilever, RBC.
- Irrigation Water Management Study Committee, 2002 – IRRIGATION WATER MANAGEMENT STUDY COMMITTEE. *South Saskatchewan River Basin: Irrigation in the 21st Century. Volume 1: Summary Report*. Lethbridge (AB) : Alberta Irrigation Projects Association.
- Iwasaki, 1937 – IWASAKI, T. « Some notes on sand filtration », *Journal American Water Works Association*, vol. 29, p. 1591-1602.
- Jackson *et al.*, 1981 – JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. et PINTER, JR, P. J. « Canopy temperature as a crop water stress indicator », *Water Resources Research*, vol. 17, n°4, p. 1133-1138.
- Jackson *et al.*, 2007 – JACKSON, B. M., WHEATER, H. S., WADE, A. J., BUTTERFIELD, D., MATHIAS, S. A., IRESON, A. M., . . . WHITEHEAD, P. G. « Catchment-scale modelling of flow and nutrient transport in the Chalk unsaturated zone », *Ecological Modelling*, vol. 209, n°1, p. 41-52.
- Jaggard *et al.*, 2010 – JAGGARD, K. W., QI, A. et OBER, E. S. « Possible changes to arable crop yields by 2050 », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, p. 2835-2851.
- Jarvie *et al.*, 2010 – JARVIE, H. P., WITHERS, P. J. A., BOWES, M. J., PALMER-FELGATE, E. J., HARPER, D. M., WASIAK, K., . . . STOATE, C. « Streamwater phosphorus and nitrogen across a gradient in rural-agricultural land use intensity », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 135, p. 238-252.
- Jiang et Somers, 2009 – JIANG, Y. et SOMERS, G. « Modeling effects of nitrate from non-point sources on groundwater quality in an agricultural watershed in Prince Edward Island, Canada », *Hydrogeology Journal*, vol. 17, n°3, p. 707-724.
- Jiang *et al.*, 2011 – JIANG, Y., ZEBARTH, B. et LOVE, J. « Long-term simulations of nitrate leaching from potato production systems in Prince Edward Island, Canada », *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 91, n°3, p. 307-325.
- Johnson *et al.*, 2011 – JOHNSON, D., HODGKINSON, R., LORD, E., SILGRAM, M., COTTRILL, B., GOODAY, R., . . . HULIN, A. *Nitrates Directive Consultation Document. The Evidence Base for Assessing the Impacts of the NVZ Action Programme on Water Quality Across England and Wales*. Wolverhampton, Royaume-Uni : ADAS UK Ltd.

- Jolly *et al.*, 2001 – JOLLY, I. D., WILLIAMSON, D. R., GILFEDDER, M., WALKER, G. R., MORTON, R., ROBINSON, G., . . . McNEILL, V. « Historical stream salinity trends and catchment salt balances in the Murray–Darling Basin, Australia », *Marine and Freshwater Research*, vol. 52, n°1, p. 53-63.
- Jones, 2004 – JONES, H. G. « Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods », *Journal of Experimental Botany*, vol. 55, n°407, p. 2427-2436.
- Jones, 2006 – JONES, S. « Consumer's View of Pork Production », *Advances in Pork Production*, vol. 17, p. 65-73.
- JRG Consulting, 2012 – JRG CONSULTING. *Planning for Tomorrow for OAC. A Report Commissioned by and Prepared for the Ontario Agricultural College, University of Guelph*. Guelph (ON) : JRG Consulting.
- Kabiri *et al.*, 2011 – KABIRI, K., OMIDIAN, H., ZOHURIAAN-MEHR, M. J. et DOROUDIANI, S. « Superabsorbent hydrogel composites and nanocomposites: A review », *Polymer Composites*, vol. 32, n°2, p. 277-289.
- Karetsos *et al.*, 2008 – KARETSOS, S., COSTOPOULOU, C. et NTALIANI, M. « Building a virtual community for organic agriculture », *International Journal of Web Based Communities*, vol. 4, n°3, p. 366-383.
- Kearney, 2010 – KEARNEY, J. « Food consumption trends and drivers », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, n°1554, p. 2793-2807.
- Kell, 2011 – KELL, D. B. « Breeding crop plants with deep roots: Their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration », *Annals of Botany*, vol. 108, n°3, p. 407-418.
- Kemp et Michalk, 2007 – KEMP, D. R. et MICHALK, D. L. « Towards sustainable grassland and livestock management », *The Journal of Agricultural Science*, vol. 145, p. 543-564.
- Kennedy et Mayer, 2002 – KENNEDY, G. et MAYER, T. « Natural and constructed wetlands in Canada: An overview », *Water Quality Research Journal of Canada*, vol. 37, n°2, p. 295-325.
- Kern, 2002 – KERN, M. « Food, feed, fibre, fuel and industrial products of the future: Challenges and opportunities. Understanding the strategic potential of plant genetic engineering », *Journal of Agronomy & Crop Science*, vol. 188, p. 291-305.
- Khan *et al.*, 2006 – KHAN, S., TARIQ, R., YUANLAI, C. et BLACKWELL, J. « Can irrigation be sustainable? », *Agricultural Water Management*, vol. 80, n°1-3, p. 87-99.

- Khan *et al.*, 2011 – KHAN, M. A., IQBAL, M., JAMEEL, M., NAZEER, W., SHAKIR, S., ASLAM, M. T. et IQBAL, B. « Potentials of molecular based breeding to enhance drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) », *African Journal of Biotechnology*, vol. 10, n°55, p. 11340-11344.
- Khoury-Nolde, s.d. – KHOURY-NOLDE, N. *Rainwater Harvesting* Adresse URL : [http://www.rainwaterconference.org/uploads/media/Rainwater\\_Harvesting\\_-\\_an\\_overview\\_.pdf](http://www.rainwaterconference.org/uploads/media/Rainwater_Harvesting_-_an_overview_.pdf) (dernière consultation : avril 2012).
- Kienholz *et al.*, 2000 – KIENHOLZ, E., CROTEAU, F., FAIRCHILD, G. L., GUZZWELL, G. K., MASSÉ, D. I. et VAN DER GULIK, T. W. *L'utilisation de l'eau*. Dans, *La santé de l'eau. Vers une agriculture durable au Canada*. Coote, D. R. et Gregorich, L. J. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.
- Kleijn *et al.*, 2006 – KLEIJN, D., BAQUERO, R. A., CLOUGH, Y., DIAZ, M., DE ESTEBAN, J., FERNÁNDEZ, F., . . . YELA, J. L. « Mixed biodiversity benefits of agri-environment schemes in five European countries », *Ecology Letters*, vol. 9, p. 243-254.
- Kling *et al.*, 2011 – KLING, H. J., WATSON, S. B., MCCULLOUGH, G. K. et STANTON, M. P. « Bloom development and phytoplankton succession in Lake Winnipeg: A comparison of historical records with recent data », *Aquatic Ecosystem Health & Management*, vol. 14, n°2, p. 219-224.
- Knauer et Bucheli, 2009 – KNAUER, K. et BUCHELI, T. D. « Nanomatériaux : recherches nécessaires pour l'agriculture », *Revue Suisse d'Agriculture*, vol. 41, n°6, p. 337-341.
- Knickel *et al.*, 2009 – KNICKEL, K., BRUNORI, G., RAND, S. et PROOST, J. « Towards a better conceptual framework for innovation processes in agriculture and rural development: From linear models to systemic approaches », *Journal of Agricultural Education and Extension*, vol. 15, n°2, p. 131-146.
- Knowles, 2006 – KNOWLES, A. « Trends and opportunities in formulation technology », *Outlooks on Pest Management*, vol. 17, n°3, p. 99-102.
- Knowles, 2008 – KNOWLES, A. « Recent developments of safer formulations of agrochemicals », *The Environmentalist*, vol. 28, n°1, p. 35-44.
- Knox *et al.*, 2007 – KNOX, J., KAY, M. et WEATHERHEAD, K. *Switching Irrigation Technologies*. Bedfordshire, Royaume-Uni : Natural England, Crandfield University, RTCS Ltd.
- Kohli *et al.*, 2010 – KOHLI, A., FRENKEN, K. et SPOTTORNO, C. *Disambiguation of Water Use Statistics*. Rome, Italie : FAO, Aquastat.
- Konar *et al.*, 2011 – KONAR, M., DALIN, C., SUWEIS, S., HANASAKI, N., RINALDO, A. et RODRIGUEZ-ITURBE, I. « Water for food: The global virtual water trade network », *Water Resources Research*, vol. 47, n°5, W05520.

- Koning *et al.*, 2006 – KONING, C. W., SAFFRAN, K. A., LITTLE, J. L. et FENT, L. « Water quality monitoring: The basis for watershed management in the Oldman River Basin, Canada », *Water Science & Technology*, vol. 53, n°10, p. 153-161.
- Kort *et al.*, 2011 – KORT, J., BANK, G., POMEROY, J. et FANG, X. « Effects of shelterbelts on snow distribution and sublimation », *Agroforestry Systems*, vol. 86, n°3, p. 335-344.
- Kourakos *et al.*, 2012 – KOURAKOS, G., KLEIN, F., CORTIS, A. et HARTER, T. « A groundwater nonpoint source pollution modeling framework to evaluate long-term dynamics of pollutant exceedance probabilities in wells and other discharge locations », *Water Resources Research*, vol. 48, DOI:10.1029/2011WR010813.
- Kremen et Ostfeld, 2005 – KREMEN, C. et OSTFELD, R. S. « A call to ecologists: Measuring, analyzing, and managing ecosystem services », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 3, n°10, p. 540-548.
- Kreutzwiser et de Loë, 2010 – KREUTZWISER, R. et DE LOË, R. *Water Security: Current and Emerging Challenges*. Dans, *Resources and Environmental Management in Canada*. 4<sup>th</sup> edition. Mitchell, B. (édit.). Toronto (ON) : Oxford University Press.
- Kulshreshtha, 2011 – KULSHRESHTHA, S. N. « Climate change, Prairie agriculture, and Prairie economy: The new normal », *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, vol. 59, p. 19-44.
- Kumar et Lal, 2012 – KUMAR, S. D. et LAL, B. R. « Effect of mulching on crop production under rainfed condition: A review », *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, vol. 2, n°2, p. 8-20.
- Kundzewicz *et al.*, 2007 – KUNDZEWICZ, Z. W., MATA, L. J., ARNELL, N. W., DÖLL, P., KABAT, P., JIMÉNEZ, B., . . . SHIKLOMANOW, I. A. *Freshwater Resources and their Management*. Dans, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. et Hanson, C. E. (édit.). Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- Kunzig, 2011 (avril) – KUNZIG, R. *Perennial Solution*. National Geographic.
- Kurukulasuriya et Rosenthal, 2003 – KURUKULASURIYA, P. et ROSENTHAL, S. *Climate Change and Agriculture. A review of Impacts and Adaptations*. Washington (DC) : La banque internationale de reconstruction et de développement, La Banque Mondiale.

- Kustas *et al.*, 2003 – KUSTAS, W. P., FRENCH, A. N., HATFIELD, J. L., JACKSON, T. J., MORAN, M. S., RANGO, A., . . . SCHMUGGE, T. J. « Remote sensing research in hydrometeorology », *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, n°6, p. 631-646.
- Lann *et al.*, 2009 – LAAN, T., LITMAN, T. A. et STEENBLIK, R. *Biofuels - At What Cost? Government Support for Ethanol and Biodiesel in Canada*. Winnipeg (MB) : International Institute for Sustainable Development, Global Subsidies Initiative.
- Laborde, 2011 – LABORDE, D. *Assessing the Land Use Change. Consequences of European Biofuels Policies. Final Report*. Washington (DC) : Institut international de recherche sur les politiques alimentaires - IFPRI.
- Ladha *et al.*, 2005 – LADHA, J. K., PATHAK, H., KRUPNIK, T. J., SIX, J. et VAN KESSEL, C. « Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects », *Advances in Agronomy*, vol. 87, p. 85-156.
- Lamba *et al.*, 2009 – LAMBA, P., FILSON, G. et ADEKUNLE, B. « Factors affecting the adoption of best management practices in southern Ontario », *The Environmentalist*, vol. 29, n°1, p. 64-77.
- Lang *et al.*, 2007 – LANG, N. L., BELLETT-TRAVERS, M. D. et SMITH, S. R. « Field investigations on the survival of *Escherichia coli* and presence of other enteric micro-organisms in biosolids-amended agricultural soil », *Journal of Applied Microbiology*, vol. 103, n°5, p. 1868-1882.
- Langergraber et Muellegger, 2005 – LANGERGRABER, G. et MUELLEGER, E. « Ecological Sanitation - A way to solve global sanitation problems? », *Environment International*, vol. 31, n°3, p. 433-444.
- Larson, 2007 – LARSON, R. *An Economic Evaluation of Best Management Practices for Crop Nutrients in Canadian Agriculture. In Fertilizer Best Management Practices. General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations*. Article présenté dans le cadre du IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Bruxelles, Belgique.
- Lave et Wenger, 1991 – LAVE, J. et WENGER, E. *Situated Learning. Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- LeBlanc *et al.*, 2008 – LEBLANC, R. J., MATTHEWS, P. et RICHARD, R. P. *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses of a Global Resource*. Nairobi, Kenya : United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT).
- Lee *et al.*, 2010 – LEE, W. S., ALCHANATIS, V., YANG, C., HIRAFUJI, M., MOSHOU, D. et LI, C. « Sensing technologies for precision specialty crop production », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 74, p. 2-33.



- Leeuwis et van den Ban, 2003 – LEEUWIS, C. et VAN DEN BAN, A. *Communication for Rural Innovation. Rethinking Agricultural Extension, 3<sup>rd</sup> Edition*. Oxford, Royaume-Uni : Blackwell Publishing company.
- Leinweber et al., 2002 – LEINWEBER, P., TURNER, B. L. et MEISSNER, R. *Phosphorus*. Dans, *Agriculture, Hydrology and Water Quality*. Haygarth, P. M. et Jarvis, S. C. (édit.). New York (NY) : CABI Publishing.
- Lemire et al., 2009 – LEMIRE, N., SOUFFEZ, K. et LAURENDEAU, M.-C. *Animer un processus de transfert des connaissances. Bilan des connaissances et outil d'animation*. Québec (QC) : Institut National de Santé Publique du Québec, Direction de la recherche, formation et développement.
- Lempert et Schlesinger, 2000 – LEMPERT, R. J. et SCHLESINGER, M. E. « Robust strategies for abating climate change », *Climatic Change*, vol. 45, n°3-4, p. 387-401.
- Li et al., 2004 – LI, F. M., WANG, J., XU, J. Z. et XU, H. L. « Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China », *Soil and Tillage Research*, vol. 78, n°1, p. 9-20.
- Li, 2006 – LI, Y. « Water saving irrigation in China », *Irrigation and Drainage*, vol. 55, n°3, p. 327-336.
- Li et al., 2011 – LI, S., ELLIOTT, J. A., TIESSEN, K. H. D., YAROTSKI, J., LOBB, D. A. et FLATEN, D. N. « The effects of multiple beneficial management practices on hydrology and nutrient losses in a small watershed in the Canadian Prairies », *Journal of Environmental Quality*, vol. 40, n°5, p. 1627-1642.
- Libecap, 2010 – LIBECAP, G. D. *Water Rights and Markets in the US Semi Arid West: Efficiency and Equity Issues. ICER Working Paper No. 30/2010*. Adresse URL : <http://ssrn.com/abstract=1738371> (dernière consultation : avril 2012).
- Lindsey et Rupert, 2012 – LINDSEY, B. D. et RUPERT, M. G. *Methods for Evaluating Temporal Groundwater Quality Data and Results of Decadal-Scale Changes in Chloride, Dissolved Solids, and Nitrate Concentrations in Groundwater in the United States, 1988-2010. Scientific Investigations Report 2012-5049*. Washington (DC) : U.S. Geological Survey.
- Lissemore et al., 2006 – LISSEMORE, L., CHUNYAN, H., YANG, C., SIBLEY, P. K., MABURY, S. et SOLOMON, K. R. « An exposure assessment for selected pharmaceuticals within a watershed in Southern Ontario », *Chemosphere*, vol. 64, p. 717-729.
- Lopes et Neto, 2010 – LOPES, D. D. et NETO, A. J. S. *Recent Advances on Agricultural Software: A Review*. Dans, *Agriculture Research and Technology*. Bundgaard, K. et Isaken, L. (édit.). New York (NY) : Nova Science Publishers Inc.

- Lovett *et al.*, 2007 – LOVETT, G. M., BURNS, D. A., DRISCOLL, C. T., JENKINS, J. C., MITCHELL, M. J., RUSTAD, L., . . . HAEUBER, R. « Who needs environmental monitoring? », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 5, n°5, p. 253-260.
- Luck *et al.*, 2010 – LUCK, J. D., ZANDONADI, R. S., LUCK, B. D. et SHEARER, S. A. « Reducing pesticide over-application with map-based automatic boom section control on agricultural sprayers », *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*, vol. 53, n°3, p. 685-690.
- Lynch, 2009 – LYNCH, D. « Environmental impacts of organic agriculture: A Canadian perspective », *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 89, p. 621-628.
- MacKay *et al.*, 2010 – MACKAY, R., BENNETT, E. M. et LEFEBVRE, A. *Using a Beneficial Management Practice (BMP) Adoption Index in Agri-Environmental Policy in Canada*. Article présenté dans le cadre du OECD Workshop on Agri-Environmental Indicators. Leysin, Suisse.
- MacKay et Hewitt, 2010 – MACKAY, R. et HEWITT, J. *La gestion agroenvironnementale*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Eilers, W., MacKay, R., Graham, L. et Lefebvre, A. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- MacRae *et al.*, 2007 – MACRAE, R. J., FRICK, B. et MARTIN, R. C. « Economic and social impacts of organic production systems », *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 87, p. 1037-1044.
- Madani *et al.*, 2010 – MADANI, A., HAVERSTOCK, M. et GORDON, R. *Design, Construction, and Operation of a Wetland/Reservoir System Receiving Agricultural Drainage Water*. Article présenté dans le cadre du 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australie.
- Mailhot *et al.*, 2010 – MAILHOT, A., KINGUMBI, A., TALBOT, G. et POULIN, A. « Future changes in intensity and seasonal pattern of occurrence of daily and multi-day annual maximum precipitation over Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 388, n°3-4, p. 173-185.
- Mainville *et al.*, 2006 – MAINVILLE, N., WEBB, J., LUCOTTE, M., DAVIDSON, R., BETANCOURT, O., CUEVA, E. et MERGLER, D. « Decrease of soil fertility and release of mercury following deforestation in the Andean Amazon, Napo River Valley, Ecuador », *Science of the Total Environment*, vol. 368, p. 88-98.
- Malinconico *et al.*, 2006 – MALINCONICO, M., SANTAGATA, G. et SCHETTINI, E. « Sprayable Polysaccharide-Based Fiber Reinforced Emulsions for Environmentally Sound Plasticulture », *Special Issue: World Polymer Congress - MACRO 2006*, vol. 245-246, n°1, p. 578-583.

- Manimegalai *et al.*, 2011 – MANIMEGALAI, G., KUMAR, S. S. et SHARMA, C. « Pesticides mineralization in water using silver nanoparticles », *International Journal of Chemical Sciences*, vol. 9, n°3, p. 1463-1471.
- Marchildon, 2009 – MARCHILDON, G. P. *A Dry Oasis: Institutional Adaptation to Climate on the Canadian Plains*. Regina (SK) : CPRC Press.
- Maredia *et al.*, 2003 – MAREDIA, K. M., DAHOUE, D. et MOTA-SANCHEZ D. (édit.). *Integrated Pest Management in the Global Arena*. Cambridge (MA) : CABI Publishing.
- Marshall *et al.*, 2009 – MARSHALL, M. R., FRANCIS, O. J., FROGBROOK, Z. L., JACKSON, B. M., MCINTYRE, N., REYNOLDS, B., . . . CHELL, J. « The impact of upland land management on flooding: Results from an improved pasture hillslope », *Hydrological Processes*, vol. 23, n°3, p. 464-475.
- Martin *et al.*, 2000 – MARTIN, F. R. J., BOOTSMA, A., COOTE, D. R., FAIRLEY, B. G., GREGORICH, L. J., LEBEDIN, J., . . . VAN DER GULIK, T. W. *Les ressources en eau du Canada rural*. Dans, *La santé de l'eau. Vers une agriculture durable au Canada*. Coote, D. R. et Gregorich, L. J. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.
- Martins-Filho *et al.*, 2010 – MARTINS-FILHO, C., TORERO, M. et YAO, F. *Estimation of quantiles based on non linear models of commodity price dynamics and extreme value theory*. Washington (DC) : IFPRI.
- Martz *et al.*, 2007 – MARTZ, L., BRUNEAU, J. et ROLFE T. (édit.). *Climate Change and Water. SSRB Final Technical Report*. South Saskatchewan River Basin (SK) : SSRB.
- Maslin et Austin, 2012 – MASLIN, M. et AUSTIN, P. « Uncertainty: Climate models at their limit? », *Nature*, vol. 486, n°7402, p. 183-184.
- McFarlane et Nilsen, 2003 – MCFARLANE, S. et NILSEN, E. *On Tap. Urban Water Issues in Canada. Discussion Paper*. Calgary (AB) : Canada West Foundation.
- McIntyre *et al.*, 2005 – MCINTYRE, N., LEE, H., WHEATER, H., YOUNG, A. et WAGENER, T. « Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments », *Water Resources Research*, vol. 41, W12434, DOI :10.1029/2005WR004289.
- Meals *et al.*, 2010 – MEALS, D. W., DRESSING, S. A. et DAVENPORT, T. E. « Lag time in water quality response to best management practices: A review », *Journal of Environmental Quality*, vol. 39, p. 85-96.
- Mearns *et al.*, 2012 – MEARNS, L. O., ARMITT, R., BINER, S., BUKOVSKY, M. S., MCGINNIS, S., SAIN, S., . . . SNYDER, M. « The North American Regional Climate Change Assessment Program: Overview of Phase I Results », *Bulletin of the American Meteorological Society*, DOI : 10.1175/bams-d-1111-00223.00221.

- Medina *et al.*, 2009 – MEDINA, Y., GOSSELIN, A., DESJARDINS, Y., GAUTHIER, L., HARNOIS, R. et KHANIZADEH, S. « Effect of plastic mulches on yield and fruit quality of strawberry plants grown under high tunnels », *Acta Horticulturae (ISHS)*, vol. 893, p. 1327-1332.
- Mekis et Vincent, 2011 – MEKIS, É. et VINCENT, L. A. « An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, n°2, p. 163-177.
- Meng et Wu, 2010 – MENG, X. et WU, X. B. *Study on the Amount of Improved Utilization of Soil Water Resources by Mulching Field in Baoding Plan. Civil Engineering in China – Current Practice and Research Report*. Article présenté dans le cadre du International Conference on Civil Engineering. Baoding, Chine.
- Milk River Watershed Council Canada, 2008 – MILK RIVER WATERSHED COUNCIL CANADA. *Milk River State of the Watershed Report 2008*. Milk River (AB) : Milk River Watershed Council Canada.
- Milk River Watershed Council Canada, 2011a – MILK RIVER WATERSHED COUNCIL CANADA. *Integrated Watershed Management Plan*. Adresse URL : [http://www.milkriverwatershedcouncil.ca/management\\_plan](http://www.milkriverwatershedcouncil.ca/management_plan) (dernière consultation : juin 2012).
- Milk River Watershed Council Canada, 2011b – MILK RIVER WATERSHED COUNCIL CANADA. *Land, Water, People - Water in the Watershed*. Adresse URL : [http://www.milkriverwatershedcouncil.ca/land\\_water\\_people\\_pg3.html](http://www.milkriverwatershedcouncil.ca/land_water_people_pg3.html) (dernière consultation : juin 2012).
- Milk River Watershed Council Canada, 2011c – MILK RIVER WATERSHED COUNCIL CANADA. *Projects*. Adresse URL : <http://www.milkriverwatershedcouncil.ca/projects.html> (dernière consultation : avril 2012).
- Milk River Watershed Council Canada, 2011d – MILK RIVER WATERSHED COUNCIL CANADA. *The Watershed*. Adresse URL : [http://www.milkriverwatershedcouncil.ca/the\\_watershed.html](http://www.milkriverwatershedcouncil.ca/the_watershed.html) (dernière consultation : juin 2012).
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005 – MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington (DC) : Island Press.
- Miller *et al.*, 2000 – MILLER, J. J., BOLTON, K. F. S. L., DE LOE, R. C., FAIRCHILD, G. L., GREGORICH, L. J., KREUTZWISER, R. D., . . . VEEMAN, T. S. *L'eau et les limites pour la croissance rurale*. Dans, *La santé de l'eau. Vers une agriculture durable au Canada*. Coote, D. R. et Gregorich, L. J. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.

- Miller *et al.*, 2011 – MILLER, M. L., BHADHA, J. H., O'CONNOR, G. A., JAWITZ, J. W. et MITCHELL, J. « Aluminum water treatment residuals as permeable reactive barrier sorbents to reduce phosphorus losses », *Chemosphere*, vol. 83, n°7, p. 978-983.
- Milly *et al.*, 2008 – MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R. M., KUNDZEWICZ, Z. W., LETTENMAIER, D. P. et STOFFER, R. J. « Stationarity is dead: Whither water management? », *Science*, vol. 319, p. 573-574.
- Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique, 2009 – MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE. *Water Use Reduction Order to Protect Fish Populations*. Adresse URL : [http://www2.news.gov.bc.ca/news\\_releases\\_2009-2013/2009ENV0020-000367.htm](http://www2.news.gov.bc.ca/news_releases_2009-2013/2009ENV0020-000367.htm) (dernière consultation : avril 2012).
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et des Forêts de l'Île-du-Prince-Édouard, 2011 – MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DES FORÊTS DE L'ÎLE-DU-PRINCE-ÉDOUARD. *2010 State of the Environment*. Charlottetown (ÎPÉ): Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et des Forêts de l'Île-du-Prince-Édouard.
- Ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2005 – MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ONTARIO. *Permit To Take Water (PTTW) Manual*. Toronto (ON) : Ministère de l'Environnement de l'Ontario, Queen's Printer for Ontario.
- Ministère de l'Environnement du Japon, 2010 – MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU JAPON. *Satoyama Initiative, About*. Adresse URL : <http://satoyama-initiative.org/en/about-2/> (dernière consultation : avril 2012).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2002 – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. *Gestion intégrée de l'eau par bassin versant*. Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/fiches.htm> (dernière consultation : avril 2012).
- Ministre de la Justice, 2002 – MINISTRE DE LA JUSTICE. *Loi sur les produits antiparasitaires*. Ottawa (ON) : Ministre de la Justice, Gouvernement du Canada.
- Mitchell et Shrubsole, 1992 – MITCHELL, B. et SHRUBSOLE, D. *Ontario Conservation Authorities: Myth and Reality*. Waterloo (ON) : Département de Géographie, Université de Waterloo.
- Mladjic *et al.*, 2011 – MLADJIC, B., SUSHAMA, L., KHALIQ, M. N., LAPRISE, R., CAYA, D. et ROY, R. « Canadian RCM projected changes to extreme precipitation characteristics over Canada », *Journal of Climate*, vol. 24, n°10, p. 2565-2584.

- Molden *et al.*, 2007a – MOLDEN, D., FAURÈS, J.-M., FINLAYSON, C. M., GITAY, H., MUYLWIJK, J., SCHIPPER, L., . . . COATES, D. *Setting the Scene*. Dans, *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Molden, D. (édit.). Londre, Royaume-Uni : Earthscan.
- Molden *et al.*, 2007b – MOLDEN, D., FRENKEN, K., BARKER, R., DE FRAITURE, C., MATI, B., SVENDSEN, M., . . . FINLAYSON, C. M. *Trends in Water and Agricultural Development*. Dans, *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Molden, D. (édit.). Londre, Royaume-Uni : Earthscan.
- Molden *et al.*, 2007c – MOLDEN, D., OWEIS, T. Y., STEDUTO, P., KIJNE, J. W., HANJRA, M. A. et BINDRABAN, P. S. *Pathways for Increasing Agricultural Water Productivity*. Dans, *Water for Food Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Molden, D. (édit.). Londre, Royaume-Uni : Earthscan.
- Montesinos, 2003 – MONTESINOS, E. « Development, registration and commercialization of microbial pesticides for plant protection », *International Microbiology*, vol. 6, p. 245-252.
- Moran *et al.*, 1994 – MORAN, M. S., CLARKE, T. R., INOUE, Y. et VIDAL, A. « Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index », *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, p. 246-263.
- Moran *et al.*, 1997 – MORAN, M. S., INOUE, Y. et BARNES, E. M. « Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management », *Remote Sensing of Environment*, vol. 61, p. 319-346.
- Morris *et al.*, 2007 – MORRIS, T. J., BOYD, D. R., BRANDES, O. M., BRUCE, J. P., HUDON, M., LUCAS, B., . . . PHARE, M. *Changing the Flow: A blueprint for Federal Action on Freshwater*. Toronto (ON) : The Gordon Water Group of Concerned Scientists and Citizens.
- Mote *et al.*, 2005 – MOTE, P. W., HAMLET, A. F., CLARK, M. P. et LETTENMAIER, D. P. « Declining mountain snowpack in western North America », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, p. 39-49.
- Motha et Baier, 2005 – MOTHA, R. P. et BAIER, W. « Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions: North America », *Climatic Change*, vol. 70, n°1, p. 137-164.
- Murray et de Loë, 2012 – MURRAY, D. et DE LOË, R. C. *Farmers' Perspectives on Collaborative Approaches to Water Governance: Summary of Findings. Prepared for Agriculture and Agri-Food Canada*. Waterloo (ON) : Water Policy and Governance Group.

- NAS, 2004a – NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE. *Adaptive Management for Water Resources Project Planning*. Washington (DC) : NAS, Committee to Assess the U.S. Army Corps of Engineers Methods of Analysis and Peer Review for Water Resources Project Planning.
- NAS, 2004b – NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE. *Facilitating Interdisciplinary Research*. Washington (DC) : NAS, Committee on Facilitating Interdisciplinary Research, Committee on Science, Engineering, and Public Policy.
- NAS, 2004c – NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE. *Valuing Ecosystem Services. Toward Better Environmental Decision-Making*. Washington (DC) : NAS, Committee on Assessing and Valuing the Services of Aquatic and Related Terrestrial Ecosystems. Water Science and Technology Board.
- NAS, 2009 – NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE. *Science and Decisions. Advancing Risk Assessment*. Washington (DC) : NAS, Committee on Improving Risk Analysis Approaches Used by the U.S. EPA, Board on Environmental Studies and Toxicology.
- NAS, 2011 – NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE. *Global Change and Extreme Hydrology: Testing Conventional Wisdom*. Washington (DC) : NAS, Committee on Hydrologic Science.
- NASA Earth Observatory, 2011 – NASA EARTH OBSERVATORY. *Toxic Algae Bloom in Lake Erie*. Adresse URL : <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=76127&src=twitter-iotd> (dernière consultation : octobre 2012).
- National Academy of Engineering, 2012 – NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING. *Grand Challenges*. Adresse URL : <http://www.engineeringchallenges.org/cms/8996.aspx> (dernière consultation : avril 2012).
- Nazarko *et al.*, 2005 – NAZARKO, O. M., VAN ACKER, R. C. et ENTZ, M. H. « Strategies and tactics for herbicide use reduction in field crops in Canada: A review », *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 85, n°2, p. 457-479.
- Nazemi *et al.*, 2012 – NAZEMI, A.-R., WHEATER, H. et ELSHORBAGY, A. *A Novel Approach to Vulnerability Assessment of Water Resources Systems: Preliminary Results For Southern Alberta, Canada*. Article présenté dans le cadre du 10<sup>th</sup> International Conference on Hydroinformatics. Hambourg, Allemagne.
- Neilsen *et al.*, 2007 – NEILSEN, D., COHEN, S., SMITH, S., FRANK, G., KOCH, W., ALILA, Y., . . . TAYLOR, B. *Agricultural Water Supply in the Okanagan Basin: Using Climate Change Scenarios to Inform Dialogue and Planning Processes*. Dans, *Farming in a Changing Climate: Agricultural Adaptation in Canada*. Wall, E., Smit, B. et Wandel, J. (édit.). Vancouver (BC) : UBC Press.

- Nelson *et al.*, 2010 – NELSON, G. C., ROSEGRANT, M. W., KOO, J., ROBERTSON, R., SULSER, T., ZHU, T., . . . BATKA, M. *The Costs of Agricultural Adaptation to Climate Change*. Washington (DC) : Institut internationale de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI).
- Nestlé, 2010 – NESTLÉ. *The Nestlé Policy on Environmental Sustainability*. Vevey, Suisse: Nestlé.
- Ng *et al.*, 2010 – NG, G. H. C., MCLAUGHLIN, D., ENTEKHABI, D. et SCANLON, B. R. « Probabilistic analysis of the effects of climate change on groundwater recharge », *Water Resources Research*, vol. 46, n°7, p. W07502.
- Nicholson *et al.*, 2005 – NICHOLSON, F. A., GROVES, S. J. et CHAMBERS, B. J. « Pathogen survival during livestock manure storage and following land application », *Bioresource Technology*, vol. 96, n°2, p. 135-143.
- NOAA, 2012a – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *State of Climate Drought, June 2012*. Adresse URL : <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/> (dernière consultation : juillet 2012).
- NOAA, 2012b – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *NOAA's Source for Snow Information*. Adresse URL : <http://www.noahrs.noaa.gov/> (dernière consultation : juin 2012).
- Nowlan et Bakker, 2010 – NOWLAN, L. et BAKKER, K. *Practising Shared Water Governance in Canada: A Primer*. Vancouver (BC) : UBC Program on Water Governance.
- OCDE, 2010 – ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES. *Gestion durable des ressources en eau dans le secteur agricole*. Paris, France : OCDE.
- OCDE-FAO, 2011 – ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES - ORGANISATIONS DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2011-2020*. OCDE-FAO.
- O'Connor, 2002 – O'CONNOR, D. R. *Part One: Report on the Walkerton Inquiry. The Events of May 2000 and Related Issues*. Toronto (ON) : Queen's Printer for Ontario, Ontario Ministry of the Attorney General.
- Oenema *et al.*, 2009 – OENEMA, O., WITZKE, H. P., KLIMONT, Z., LESSCHEN, J. P. et VELTHOF, G. L. « Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27 », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 133, n°3-4, p. 280-288.
- OFAC, 2010 – ONTARIO FARM ANIMAL COUNCIL. *News Release: Positive Perception of Canadian Farming on the Rise, Survey Shows*. Adresse URL : <http://www.ofac.org/news/2010/Public%20study%20results.php> (dernière consultation : août 2011).
- O'Faircheallaigh, 2010 – O'FAIRCHEALLAIGH, C. « Public participation and environmental impact assessment: Purposes, implications, and lessons for public policy making », *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 30, p. 19-27.



- O’Kane *et al.*, 2008 – O’KANE, M. P., PAINE, M. S. et KING, B. J. « Context, participation and discourse: The role of the communities of practice concept in understanding farmer decision-making », *Journal of Agricultural Education and Extension*, vol. 14, n°3, p. 187-201.
- Oldman Watershed Council, 2005 – OLDMAN WATERSHED COUNCIL. *Oldman River Basin Water Quality Initiative. Five Year Summary Report*. Lethbridge (AB) : Oldman Watershed Council.
- Olesen *et al.*, 2007 – OLESEN, J. E., CARTER, T. R., DÍAZ-AMBRONA, C. H., FRONZEK, S., HEIDMANN, T., HICKLER, T., . . . PALUTIKOF, J. P. « Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models », *Climatic Change*, vol. 81, n°S1, p. 123-143.
- Olson *et al.*, 2009 – OLSON, B. M., BENNETT, D. R., MACKENZIE, R. H., ORMANN, T. D. et ATKINS, R. P. « Nitrate leaching in two irrigated soils with different rates of cattle manure », *Journal of Environmental Quality*, vol. 38, n°6, p. 2218-2228.
- OMM, 2008 – ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE. *Guide to Hydrological Practices. Volume I and II*. Genève, Suisse: OMM.
- OMS, 2011 – ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *Guidelines for Drinking-Water Quality. Fourth Edition*. Genève, Suisse: OMS.
- O’Neill et Dobrowolski, 2011 – O’NEILL, M. P. et DOBROWOLSKI, J. P. « Water and agriculture in a changing climate », *HortScience*, vol. 46, n°2, p. 155-157.
- O’Neill, 2011 – O’NEILL, T. *What Is the Importance of Water to Producers and How Can Environmental Stewardship Be Promoted as a Marketing Tool?* Dans, *Water Innovation Forum Report: A Competitive and Innovative Agriculture Sector*. Cunningham, D., Coates, L. et Harris, M. (édit.). London (ON) : Lawrence National Centre for Policy and Management.
- Ongley, 1996 – ONGLEY, E. D. *Introduction to Agricultural Water Pollution*. Dans, *Control of Water Pollution from Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 55*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture.
- Ontario, 2009 – ONTARIO. *Tables of Drinking Water Threats. Clean Water Act, 2006. PIBS 7561e02*. Toronto (ON) : Ministère de l’Environnement de l’Ontario.
- Ontario, s.d. – ONTARIO. *Loi de 2006 sur l’eau saine - Ontario Regulation 288/07*. Adresse URL : [http://www.e-laws.gov.on.ca/html/statutes/french/elaws\\_statutes\\_06c22\\_f.htm](http://www.e-laws.gov.on.ca/html/statutes/french/elaws_statutes_06c22_f.htm) (dernière consultation : août 2012).
- Ontario Soil and Crop Improvement Association, 2010 – ONTARIO SOIL AND CROP IMPROVEMENT ASSOCIATION. *Canada-Ontario Farm Stewardship Program (COFSP)*. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ministère de l’Agriculture de l’Ontario

- ONU, 2011 – NATIONS UNIES, DÉPARTEMENT DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES ET SOCIALES. *Perspectives démographiques mondiales, révision de 2010*. Adresse URL : <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm> (dernière consultation : avril 2012).
- Opara-Nadi, 1993 – OPARA-NADI, O. A. *Conservation Tillage for Increased Crop Production*. Dans, *Soil Tillage in Africa: Needs and Challenges*. FAO Soils Bulletin 69. Rome, Italie : Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division, FAO.
- Orts *et al.*, 2007 – ORTS, W. J., ROA-ESPINOSA, A., SOJKA, R. E., GLENN, G. M., IMAM, S. H., ERLACHER, K. et PEDERSEN, J. S. « Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agricultural, construction, and military applications », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, p. 58-66.
- Oster, 1997 – OSTER, J. D. « Future challenges of irrigated agriculture using poor quality water », *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 22, n°1, p. 175-198.
- Owen *et al.*, 2000 – OWEN, L., HOWARD, W. et WALDRON, M. « Conflicts over farming practices in Canada: The role of interactive conflict resolution approaches », *Journal of Rural Studies*, vol. 16, n°4, p. 475-483.
- Ozkan, 2009 – OZKAN, E. *Current Status and Future Trends in Pesticide Application Technology*. Article présenté dans le cadre du CIGR Proceedings, Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems. Rosario, Argentine.
- Pahl-Wostl, 2007 – PAHL-WOSTL, C. « Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change », *Water Resources Management*, vol. 21, n°1, p. 49-62.
- PAMPA, 2010 – PROGRAMME D'AMÉLIORATION DU MILIEU PÉDOLOGIQUE ET AQUATIQUE. Adresse URL : <http://gis.lrs.uoguelph.ca/agrienvarchives/sweep/francais/sweep/hom.html> (dernière consultation : juillet 2012).
- Pardossi et Incrocci, 2011 – PARDOSI, A. et INCROCCI, L. « Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops », *HortTechnology*, vol. 21, n°3, p. 309-313.
- Parrott *et al.*, 2010 – PARROTT, W., CHASSY, B., LIGON, J., MEYER, L., PETRICK, J., ZHOU, J., . . . LEVINE, M. « Application of food and feed safety assessment principles to evaluate transgenic approaches to gene modulation in crops », *Food and Chemical Toxicology*, vol. 48, n°7, p. 1773-1790.
- Patoine *et al.*, 2012 – PATOINE, M., HÉBERT, S. et D'AUTEUIL-POTVIN, F. « Water quality trends in the last decade for ten watersheds dominated by diffuse pollution in Québec (Canada) », *Water Science and Technology*, vol. 65, n°6, p. 1095-1101.

- Peden *et al.*, 2007 – PEDEN, D., TADESSE, G., MISRA, A. K., AWAD AMED, F., ASTATKE, A., AYALNEH, W., . . . YIMEGNUHAL, A. *Water and Livestock for Human Development*. Dans, *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Molden, D. (édit.). Londre, Royaume-Uni : Earthscan.
- Pedersen *et al.*, 2005 – PEDERSEN, S. M., FOUNTAS, S., HAVE, H. et BLACKMORE, B. S. *Agricultural robots: An economic feasibility study*. Article présenté dans le cadre du Precision Agriculture '05 - 5th European Conference on Precision Agriculture. Uppsal, Suède.
- Pellerin et Wannamaker, 2005 – PELLERIN, L. et WANNAMAKER, P. E. « Multi-dimensional electromagnetic modeling and inversion with application to near-surface earth investigations », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, p. 71-102.
- Pellerin *et al.*, 2009 – PELLERIN, B. A., DOWNING, B. D., KENDALL, C., DAHLGREN, R. A., KRAUS, T. E. C., SARACENO, J., . . . BERGAMASCHI, B. A. « Assessing the sources and magnitude of diurnal nitrate variability in the San Joaquin River (California) with an in situ optical nitrate sensor and dual nitrate isotopes », *Freshwater Biology*, vol. 54, n°2, p. 376-387.
- Pellerin *et al.*, 2012 – PELLERIN, B. A., SARACENO, J. F., SHANLEY, J. B., SEBESTYEN, S. D., AIKEN, G. R., WOLLHEIM, W. M. et BERGAMASCHI, B. A. « Taking the pulse of snowmelt: *In situ* sensors reveal seasonal, event and diurnal patterns of nitrate and dissolved organic matter variability in an upland forest stream », *Biogeochemistry*, vol. 108, n°1-3, p. 183-198.
- Perman *et al.*, 2011 – PERMAN, R., MA, Y., COMMON, M., MADDISON, D. et MCGILVRAY, J. *Natural Resource and Environmental Economics. 3<sup>rd</sup> edition*. Toronto (ON) : Pearson Education Canada.
- Pescod, 1992 – PESCOD, M. B. *Wastewater Treatment and Use in Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 47*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Peterson, 1998 – PETERSON, H. G. « Use of constructed wetlands to process agricultural wastewater », *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 78, n°2, p. 199-210.
- Pettitt et Hutchinson, 2005 – PETTITT, T. R. et HUTCHINSON, D. *Slow Sand Filtration (A Flexible, Economic Biofiltration Method for Cleaning Irrigation Water) : A Grower Guide*. Kent, Royaume-Uni : Horticultural Development Council, Bradbourne House, East Malling.
- Phare, 2009 – PHARE, M.-A. S. *Denying the Source. The Crisis of First Nations Water Rights*. Surrey (BC) : Rocky Mountain Books.

- Phipps et Crumpton, 1994 – PHIPPS, R. G. et CRUMPTON, W. G. « Factors affecting nitrogen loss in experimental wetlands with different hydrologic loads », *Ecological Engineering*, vol. 3, n°4, p. 399-408.
- Piesse et Thirtle, 2010 – PIESSE, J. et THIRTLE, C. « Agricultural R&D, technology and productivity », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, p. 3035-3047.
- Pietroniro *et al.*, 2007 – PIETRONIRO, A., FORTIN, V., KOUWEN, N., NEAL, C., TURCOTTE, R., DAVISON, B., . . . PELLERIN, P. « Development of the MESH modelling system for hydrological ensemble forecasting of the Laurentian Great Lakes at the regional scale », *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 11, n°4, p. 1279-1294.
- Pietsch et McAllister, 2010 – PIETSCH, J. et MCALLISTER, I. « A diabolical challenge: Public opinion and climate change policy in Australia », *Environmental Politics*, vol. 19, n°2, p. 217-236.
- PLUARG, 2010 – *International Reference Group on Great Lakes Pollution from Land Use Activities*. Adresse URL : <http://gis.lrs.uoguelph.ca/AgriEnvArchives/pluarg/pluarg.html> (dernière consultation : juillet 2012).
- Plummer *et al.*, 2011 – PLUMMER, R., DE GROESBOIS, D., DE LOË, R. C. et VELANIŠKIS, J. « Probing the integration of land use and watershed planning in a shifting governance regime », *Water Resources Research*, vol. 47, W09502, DOI :10.1029/2010WR010213.
- Poirier, 2009 – POIRIER, M.-È. *Enquête sur l'utilisation agricole de l'eau 2007, rapport méthodologique. Document technique*. Ottawa (ON) : Statistique Canada.
- Poirier et de Loë, 2011 – POIRIER, B. A. et DE LOË, R. C. « Protecting aquatic ecosystems in heavily allocated river systems: The case of the Oldman River Basin, Alberta », *Canadian Geographer*, vol. 55, n°2, p. 243-261.
- Pollution Probe, 2007 – POLLUTION PROBE. *Towards a Vision and Strategy for Water Management in Canada. Final Report of the Water Policy in Canada National Workshop Series*. Toronto (ON) : Pollution Probe.
- Pomeroy *et al.*, 1993 – POMEROY, J. W., GRAY, D. M. et LANDINE, P. G. « The prairie blowing snow model: Characteristics, validation, operation », *Journal of Hydrology*, vol. 144, n°1-4, p. 165-192.
- Pomeroy et Gray, 1995 – POMEROY, J. W. et GRAY, D. M. *Snowcover Accumulation, Relocation and Management. NHRI Science Report No. 7*. Saskatoon (SK) : Environnement Canada.
- Pomeroy et Li, 2000 – POMEROY, J. W. et LI, L. « Prairie and Arctic areal snow cover mass balance using a blowing snow model », *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, n°D21, p. 26619-26634.

- Pomeroy *et al.*, 2007 – POMEROY, J. W., GRAY, D. M., BROWN, T., HEDSTROM, N. R., QUINTON, W. L., GRANGER, R. J. et CAREY, S. K. « The cold regions hydrological model: A platform for basing process representation and model structure on physical evidence », *Hydrological Processes*, vol. 21, n°19, p. 2650-2667.
- Pomeroy *et al.*, 2010 – POMEROY, J. W., FANG, X., WESTBROOK, C., MINKE, A., GUO, X. et BROWN, T. *Prairie Hydrological Model Study. Final Report. Center for Hydrology Report No. 7*. Saskatoon (SK) : Center for Hydrology, Université de la Saskatchewan.
- Potts *et al.*, 2010 – POTTS, J., VAN DER MEER, J. et DAITCHMAN, J. *The State of Sustainability Initiatives Review 2010: Sustainability and Transparency. A joint Initiative of IISD, IIED, Aidenvironment, UNCTAD, and ENTWINED*. Winnipeg (MB) : Institut international du développement durable et the International Institute for Environment Development.
- Power, 2010 – POWER, A. G. « Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, p. 2959-2971.
- Prakash, 2011 – PRAKASH, A. *Why Volatility Matters*. Dans, *Safeguarding Food Security in Volatile Global Markets*. Prakash, A. (édit.). Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Pretty, 2008 – PRETTY, J. « Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 363, n°1491, p. 447-465.
- Privette *et al.*, 2011 – PRIVETTE, C. V., KHALILIAN, A., TORRES, O. et KATZBERG, S. « Utilizing space-based GPS technology to determine hydrological properties of soils », *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, n°12, p. 3582-3586.
- Province du Manitoba, 2011 – PROVINCE DU MANITOBA. *2011/12 Quarterly Financial Report. April to September 2011*. Manitoba: Government Reporting Entity (GRE).
- Prowse *et al.*, 2004 – PROWSE, T. D., WRONA, F. J. et POWER, G. *Barrages, réservoirs et régulation du débit des eaux*. Dans, *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE n° 3 et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC n° 1*. Burlington (ON) : Institut national de recherche scientifique, Environnement Canada.
- Pu-Te, 2010 – PU-TE, W. « The modern water-saving agricultural technology: Progress and focus », *African Journal of Biotechnology*, vol. 9, n°37, p. 6017-6026.
- Qadir *et al.*, 2007 – QADIR, M., SHARMA, B. R., BRUGGEMAN, A., CHOUKR-ALLAH, R. et KARAJEH, F. « Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries », *Agricultural Water Management*, vol. 87, p. 2-22.

- RAE, 2009 – THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. *Synthetic Biology: Scope, Applications and Implications*. Londres, Royaume-Uni : The Royal Academy of Engineering.
- Ragauskas *et al.*, 2006 – RAGAUSKAS, A. J., WILLIAMS, C. K., DAVISON, B. H., BRITOVSEK, G., CAIRNEY, J., ECKERT, C. A., . . . LIOTTA, C. L. « The path forward for biofuels and biomaterials », *Science*, vol. 311, n°5760, p. 484-489.
- Rainforest Alliance, 2012 – RAINFOREST ALLIANCE. *Notre action en matière d'agriculture durable*. Adresse URL : <http://www.rainforest-alliance.org/fr/work/agriculture> (dernière consultation : juin 2012).
- Ramankutty *et al.*, 2008 – RAMANKUTTY, N., EVAN, A. T., MONFREDA, C. et FOLEY, J. A. « Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000 », *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 22, n°1, p. 1-19.
- Raudsepp-Hearne *et al.*, 2010 – RAUDSEPP-HEARNE, C., PETERSON, G. D., TENGÖ, M., BENNETT, E. M., HOLLAND, T., BENESSAIAH, K., . . . PFEIFER, L. « Untangling the environmentalists paradox: Why is human well-being increasing as ecosystem services degrade? », *BioScience*, vol. 60, n°8, p. 576-589.
- Rawluk et Racz, 2009 – RAWLUK, C. et RACZ, G. *Phosphors for Life*. Ottawa (ON) : Crop Nutrients Council.
- Raymond *et al.*, 2010 – RAYMOND, C. M., FAZEY, I., REED, M. S., STRINGER, L. C., ROBINSON, G. M. et EVELY, A. C. « Integrating local and scientific knowledge for environmental management », *Journal of Environmental Management*, vol. 91, n°8, p. 1766-1777.
- Reed, 2008 – REED, M. S. « Stakeholder participation for environmental management: A literature review », *Biological Conservation*, vol. 141, n°10, p. 2417-2431.
- Reed *et al.*, 2010 – REED, M. S., EVELY, A. C., CUNDILL, G., FAZEY, I., GLASS, J., LAING, A., . . . STRINGER, L. C. « What is social Learning? », *Ecology and Society*, vol. 15, n°4, p. r1.
- Reichenberger *et al.*, 2007 – REICHENBERGER, S., BACH, M., SKITSCHAK, A. et FREDE, H.-G. « Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground- and surface water and their effectiveness: A review », *Science of the Total Environment*, vol. 384, p. 1-35.
- Richardson *et al.*, 2004 – RICHARDSON, L., HAIRSINE, P. B. et ELLIS, T. W. *Water farms: A review of the physical aspects of water harvesting and runoff enhancement in rural landscapes. Technical Report. Report 04/6*. Canberra, Australie : Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.
- Rivera et Sulaiman, 2009 – RIVERA, W. M. et SULAIMAN, V. R. « Extension: Object of reform, engine for innovation », *Outlook on Agriculture*, vol. 38, n°3, p. 267-273.

- RNCAN, 2004 – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Ottawa (ON) : RNCAN.
- Robertson *et al.*, 2007 – ROBERTSON, W. D., PTACEK, C. J. et BROWN, S. J. « Geochemical and hydrogeological impacts of a wood particle barrier treating nitrate and perchlorate in ground water », *Ground Water Monitoring & Remediation*, vol. 27, n°2, p. 85-95.
- Robins, 2007 – ROBINS, L. « Nation-wide decentralized governance arrangements and capacities for integrated watershed management: Issues and insights from Canada », *Environments*, vol. 35, n°2, p. 1-47.
- Roblin et Barrow, 2000 – ROBLIN, P. et BARROW, D. A. « Microsystems technology for remote monitoring and control in sustainable agricultural practices », *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 2, n°5, p. 385-392.
- Rockström *et al.*, 2010 – ROCKSTRÖM, J., KARLBERG, L., WANI, S. P., BARRON, J., HATIBU, N., OWEIS, T., . . . QIANG, Z. « Managing water in rainfed agriculture - The need for a paradigm shift », *Agricultural Water Management*, vol. 97, n°4, p. 543-550.
- Rogers et Hall, 2003 – ROGERS, P. et HALL, A. W. *Effective Water Governance. TEC Background Papers No. 7*. Stockholm, Suède : Global Water Partnership, Technical Committee (TEC).
- Rogers et Smith, 2007 – ROGERS, M. et SMITH, S. R. « Ecological impact of application of wastewater biosolids to agricultural soil », *Water and Environment Journal*, vol. 21, n°1, p. 34-40.
- Röling et Wagemakers, 2000 – RÖLING, N. G. et WAGEMAKERS M.A.E. (édit.). *Facilitating Sustainable Agriculture. Participatory Learning and Adaptive Management in Times of Environmental Uncertainty*. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- Röling, 2009 – RÖLING, N. « Pathways for impact: Scientists' different perspectives on agricultural innovation », *International Journal of Agricultural Sustainability*, vol. 7, n°2, p. 83-94.
- Rood et Vandersteen, 2010 – ROOD, S. B. et VANDERSTEEN, J. W. « Relaxing the principle of prior appropriation: Stored water and sharing the shortage in Alberta, Canada », *Water Resources Management*, vol. 24, n°8, p. 1605-1620.
- Rosegrant et Gazmuri, 1995 – ROSEGRANT, M. W. et GAZMURI, R. « Reforming water allocation policy through markets in tradable water rights: Lessons from Chile, Mexico and California », *Latin American Journal of Economics*, vol. 32, n°97, p. 291-316.
- Rosegrant *et al.*, 2009 – ROSEGRANT, M. W., RINGLER, C. et ZHU, T. « Water for agriculture: Maintaining food security under growing scarcity », *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 34, p. 205-222.

- Rost *et al.*, 2009 – ROST, S., GERTEN, D., HOFF, H., LUCHT, W., FALKENMARK, M. et ROCKSTRÖM, J. « Global potential to increase crop production through water management in rainfed agriculture », *Environmental Research Letters*, vol. 4, 044002.
- Roy *et al.*, 2011 – ROY, P., GACHON, P. et LAPRISE, R. « Assessment of summer extremes and climate variability over the north-east of North America as simulated by the Canadian Regional Climate Model », *International Journal of Climatology*, DOI : 10.1002/joc.2382.
- Rozemeijer *et al.*, 2010 – ROZEMEIJER, J. C., VAN DER VELDE, Y., VAN GEER, F. C., BIERKENS, M. F. P. et BROERS, H. P. « Direct measurements of the tile drain and groundwater flow route contributions to surface water contamination: From field-scale concentration patterns in groundwater to catchment-scale surface water quality », *Environmental Pollution*, vol. 158, n°12, p. 3571-3579.
- Ruane *et al.*, 2012 – RUANE, E. M., MURPHY, P. N. C., CLIFFORD, E., O'REILLY, E., FRENCH, P. et RODGERS, M. « Performance of a woodchip filter to treat dairy soiled water », *Journal of Environmental Management*, vol. 95, n°1, p. 49-55.
- Rude et Meilke, 2006 – RUDE, J. et MEILKE, K. D. « Canadian agriculture and the Doha Development Agenda - The challenges », *The Estey Centre Journal of International Law and Trade Policy*, vol. 7, n°1, p. 32-48.
- Ruselle *et al.*, 2007 – RUSSELLE, M. P., ENTZ, M. H. et FRANZLUEBBERS, A. J. « Reconsidering integrated crop-livestock systems in North America », *Agronomy Journal*, vol. 99, n°2, p. 325-334.
- Sadler *et al.*, 2005 – SADLER, E. J., EVANS, R. G., STONE, K. C. et CAMP, C. R. « Opportunities for conservation with precision irrigation », *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 60, n°6, p. 371-378.
- Sadler Richards, 2003 – SADLER RICHARDS, J. « A new era for EDSS? Water ignites a fear of farming », *Environmental Modelling & Software*, vol. 18, n°6, p. 487-490.
- Saeys *et al.*, 2004 – SAEYS, W., DARIUS, P. et RAMON, H. « Potential for on-site analysis of hog manure using a visual and near infrared diode array reflectance spectrometer », *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol. 12, n°5, p. 299-309.
- Salado, 2009 – SALADO, R. *Environmental, Economic and Social Impacts of the Use of Sewage Sludge on Land. Consultation Report on Options and Impacts*. Bruxelles, Belgique : Milieu Ltd., Report to the European Commission.
- Salazar-Ordóñez et Sayadi, 2008 – SALAZAR-ORDÓÑEZ, M. et SAYADI, S. *Environmental Issues of Agriculture: Social Perception Analysis in Southern Spain*. Article présenté dans le cadre du 12<sup>th</sup> EAAE Congress, People, Food and Environments: Global Trends and European Strategies. Gent, Belgique.



- Sanders *et al.*, 1995 – SANDERS, D. C., COOK, W. P. et GRANBERRY, D. *Plasticulture for Commercial Vegetables*. North Carolina Cooperative Extension Service, North Carolina State University.
- Sanders, 2001 – SANDERS, D. C. *Using plastic mulches and drip irrigation for vegetable production. Horticulture Information Leaflets. North Carolina Cooperative Extension Service*. Adresse URL : <http://www3.ag.purdue.edu/counties/hancock/Documents/AgFiles/NCUsing%20Plastic%20Mulches%20and%20Drip%20Irrigation.pdf> (dernière consultation : juillet 2012).
- Santé Canada, 2004 – SANTÉ CANADA. *Évaluation des risques pour l'environnement*. Adresse URL : [http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pest/part/protect-protoger/regist-homolog/\\_review-eval/envIRON-fra.php](http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pest/part/protect-protoger/regist-homolog/_review-eval/envIRON-fra.php) (dernière consultation : avril 2012).
- Santé Canada, 2009a – SANTÉ CANADA. *Giardia et cryptosporidium dans l'eau potable*. Adresse URL : [http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/giardia\\_cryptosporidium-fra.php](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/giardia_cryptosporidium-fra.php) (dernière consultation : avril 2012).
- Santé Canada, 2009b – SANTÉ CANADA. *Programme de réévaluation*. Adresse URL : [http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pest/part/protect-protoger/regist-homolog/\\_re-eval/index-fra.php](http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pest/part/protect-protoger/regist-homolog/_re-eval/index-fra.php) (dernière consultation : avril 2012).
- Santé Canada, 2010 – SANTÉ CANADA. *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau sommaire*. Ottawa (ON) : Santé Canada.
- Santé Canada, 2011a – SANTÉ CANADA. *Foire aux questions. Qui peut demander l'homologation d'un pesticide?* Adresse URL : <http://hc-sc.gc.ca/cps-spc/pest/faq-fra.php> (dernière consultation : avril 2012).
- Santé Canada, 2011b – SANTÉ CANADA. *Protéger votre santé et l'environnement*. Adresse URL : <http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pest/part/protect-protoger/index-fra.php> (dernière consultation : avril 2012).
- Sarris, 2009 – SARRIS, A. *Evolving Structure of World Agricultural Trade and Requirements for New World Trade Rules*. Article présenté dans le cadre du Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. Rome, Italie.
- Saunders et Wenig, 2007 – SAUNDERS, J. O. et WENIG, M. M. *Whose Water? Canadian Water Management and the Challenges of Jurisdictional Fragmentation*. Dans, *Eau Canada: The Future of Canada's Water*. Bakker, K. (édit.). Toronto (ON) : UBC Press.
- Sayers *et al.*, 2012 – SAYERS, P. B., GALLOWAY, G. E. et HALL, J. W. *Robust Decision-Making under Uncertainty - Towards Adaptive and Resilient Flood Risk Management Infrastructure*. Dans, *Flood Risk: Planning, Design and Management of Flood Defence Infrastructure*. Sayers, P. B. (édit.). Londres, Royaume-Uni: ICE Publishing.
- Schettini *et al.*, 2008 – SCHETTINI, E., VOX, G., CANDURA, A., MALINCONICO, M., IMMIRZI, B. et SANTAGATA, G. « Starch-based films and spray coatings as biodegradable alternatives to LDPE mulching films », *Acta Horticulturae (ISHS)*, vol. 801, p. 171-180.

- Scheuerell et Mahaffee, 2002 – SCHEUERELL, S. et MAHAFFEE, W. « Compost tea: Principles and prospects for plant disease control », *Compost Science & Utilization*, vol. 10, n°4, p. 313-338.
- Schiermeier, 2010 – SCHIERMEIER, Q. « The real holes in climate science », *Nature*, vol. 463, n°7279, p. 284-287.
- Schmoll *et al.*, 2006 – SCHMOLL, O., CHORUS, I. et APPLEYARD, S. *Establishing Groundwater Management Priorities*. Dans, *Protecting Groundwater for Health. Managing the Quality fo Drinking-Water Sources*. Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J. et Chorus, I. (édit.). Londres, Royaume-Uni : IWA Publishing, Alliance House.
- Schumann, 2010 – SCHUMANN, A. W. « Precise placement and variable rate fertilizer application technologies for horticultural crops », *HortTechnology*, vol. 20, n°1, p. 34-40.
- Searchinger *et al.*, 2008 – SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R. A., DONG, F., ELOBEID, A., FABIOSA, J., . . . YU, T. H. « Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change », *Science*, vol. 319, n°5867, p. 1238-1240.
- Sekar et Randhir, 2007 – SEKAR, I. et RANDHIR, T. O. « Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems », *Journal of Hydrology*, vol. 334, n°1-2, p. 39-52.
- Service Météorologique du Canada – Environnement Canada, 2008 – SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE DU CANADA - ENVIRONNEMENT CANADA. *The Canadian National Report on Systematic Observations for Climate. National Activities with Respect to the Global Climate Observing System (GCOS) Implementation Plan*. Gatineau (QC) : Service météorologique du Canada - Environnement Canada.
- Shabman et Stephenson, 2007 – SHABMAN, L. et STEPHENSON, K. « Achieving nutrient water quality goals: Bringing market-like principles to water quality management », *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 43, n°4, p. 1076-1089.
- Shangyou *et al.*, 1997 – SHANGYOU, S., TINGLU, F. et YONG, W. « Comprehensive sustainable development of dryland agriculture in Northwest China », *Journal of Sustainable Agriculture*, vol. 9, n°4, p. 67-84.
- Sharpley *et al.*, 2009 – SHARPLEY, A. N., KLEINMAN, P.J. A., JORDAN, P., BERGSTRÖM, L. et ALLEN, A. L. « Evaluating the success of phosphorus management from field to watershed », *Journal of Environmental Quality* vol. 38, p. 1981-1988.
- Shepherd et Walsh, 2007 – SHEPHERD, K. D. et WALSH, M. G. « Infrared spectroscopy—enabling an evidence-based diagnostic surveillance approach to agricultural and environmental management in developing countries », *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol. 15, p. 1-19.
- Shook et Pomeroy, 2010 – SHOOK, K. R. et POMEROY, J. W. « Hydrological effects of the temporal variability of the multiscaling of snowfall on the Canadian prairies », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, n°7, p. 1195-1203.

- Shook et Pomeroy, 2011 – SHOOK, K. R. et POMEROY, J. W. « Memory effects of depositional storage in Northern Prairie hydrology », *Hydrological Processes*, vol. 25, n°25, p. 3890-3898.
- Shook et Pomeroy, 2012 – SHOOK, K. R. et POMEROY, J. W. « Changes in the hydrological character of rainfall on the Canadian prairies », *Hydrological Processes*, vol. 26, p. 1752-1766.
- Simpson *et al.*, 2009 – SIMPSON, H., DE LOË, R. C. et RUDOLPH, D. L. *Incorporating Local Experiential Knowledge and Societal Values in Source Water Protection through a Broader Risk Analysis*. Article présenté dans le cadre du GeoHalifax 2009. 62<sup>nd</sup> Canadian Geotechnical Conference and 10<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference. Halifax (NS).
- Sinfield *et al.*, 2010 – SINFIELD, J. V., FAGERMAN, D. et COLIC, O. « Evaluation of sensing technologies for on-the-go detection of macro-nutrients in cultivated soils », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 70, n°1, p. 1-18.
- Singh et Bicudo, 2005 – SINGH, A. et BICUDO, J. R. « Dairy manure nutrient analysis using quick tests », *Environmental Technology*, vol. 26, n°5, p. 471-478.
- Sivapalan *et al.*, 2003 – SIVAPALAN, M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S. W., GUPTA, V. K., KARAMBIRI, H., LAKSHMI, V., . . . ZEHE, E. « IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences », *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, n°6, p. 857-880.
- Slaughter *et al.*, 2008 – SLAUGHTER, D. C., GILES, D. K. et DOWNEY, D. « Autonomous robotic weed control systems: A review », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 61, p. 63-78.
- Smith *et al.*, 1999 – SMITH, S. R., CARTMELL, E. et TOMPKINS, J. A. *Nitrate Removal from Groundwater by In Situ Bioremediation: Constraints and Opportunities*. Article présenté dans le cadre du CIWEM National Conference on Making Better Use of Water. Londres, Royaume-Uni.
- Smith *et al.*, 2005 – SMITH, E., GORDON, R., MADANI, A. et STRATTON, G. « Pathogen removal by agricultural constructed wetlands in cold climates », *Journal of Environmental Informatics*, vol. 6, n°1, p. 46-50.
- Smith *et al.*, 2006 – SMITH, E., GORDON, R., MADANI, A. et STRATTON, G. « Year-round treatment of dairy wastewater by constructed wetlands in Atlantic Canada », *Wetlands*, vol. 26, n°2, p. 349-357.
- Smith et Kellman, 2011 – SMITH, E. L. et KELLMAN, L. M. « Examination of nitrate concentration, loading and isotope dynamics in subsurface drainage under standard agricultural cropping in Atlantic Canada », *Journal of Environmental Management*, vol. 92, n°11, p. 2892-2899.
- Sojka *et al.*, 2007 – SOJKA, R. E., BJORNEBERG, D. L., ENTRY, J. A., LENTZ, R. D. et ORTS, W. J. « Polyacrylamide in agriculture and environmental land management », *Advances in Agronomy*, vol. 92, p. 75-162.

- Sparling et Brethour, 2007 – SPARLING, B. et BRETHOUR, C. *An Economic Evaluation of Beneficial Management Practices for Crop Nutrients in Canadian Agriculture. CAES Selected Paper*. Article présenté dans le cadre du American Agricultural Economics Association Annual Meeting. Portland (OR).
- Speer et Champagne, 2006 – SPEER, S. et CHAMPAGNE, P. *Constructed Wetlands: The Canadian Context*. Article présenté dans le cadre du Advanced Technology in the Environment Field. Îles Canaries, Espagne.
- Spence *et al.*, 2005 – SPENCE, C., POMEROY, J. W. et PIETRONIRO, A. *Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions*. Cambridge (ON) : Association canadienne des ressources hydriques.
- Sprague, 2007 – SPRAGUE, J. B. *Great Wet North? Canada's Myth of Water Abundance*. Dans, *Eau Canada: The Future of Canada's Water*. Bakker, K. (édit.). Toronto (ON) : UBC Press.
- Srivastava, 2001 – SRIVASTAVA, R. C. « Methodology for design of water harvesting system for high rainfall areas », *Agricultural Water Management*, vol. 47, n°1, p. 37-53.
- Stankey *et al.*, 2005 – STANKEY, G. H., CLARK, R. N. et BORMANN, B. T. *Adaptive Management of Natural Resources: Theory, Concepts, and Management Institutions. General Technical Report PNW-GTR-654*. Washington (DC) : USDA, Forest Service.
- Statistique Canada, 2007 – STATISTIQUE CANADA. *Enquête sur la gestion agroenvironnementale 2006*. Ottawa (ON) : Statistique Canada.
- Statistique Canada, 2008 – STATISTIQUE CANADA. *L'activité humaine et l'environnement : statistiques annuelles 2007 et 2008. Catalogue n° 16-201-X*. Ottawa (ON) : Statistique Canada.
- Statistique Canada, 2009 – STATISTIQUE CANADA. *Un portrait de l'agriculture canadienne*. Adresse URL : <http://www.statcan.gc.ca/ca-ra2006/articles/snapshot-portrait-fra.htm> (dernière consultation : avril 2012).
- Statistique Canada, 2010a – STATISTIQUE CANADA. *L'offre d'eau au Canada - réserves et débits*. Adresse URL : <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2010000/part-partie2-fra.htm> (dernière consultation : avril 2012).
- Statistique Canada, 2010b – STATISTIQUE CANADA. *L'activité humaine et l'environnement : Offre et demande de l'eau au Canada 2010. Catalogue n° 16-201-X*. Ottawa (ON) : Statistique Canada.
- Statistique Canada, 2011a – STATISTIQUE CANADA. *Enquête sur l'eau dans l'agriculture*. Adresse URL : <http://www.statcan.gc.ca/daily-quotidien/110919/dq110919a-fra.htm> (dernière consultation : avril 2012).
- Statistique Canada, 2011b – STATISTIQUE CANADA. *Utilisation de l'eau à des fins agricoles au Canada*. Ottawa (ON) : Statistique Canada, Ministère de l'Industrie.

- Statistique Canada, 2012 – STATISTIQUE CANADA. *Un portrait de l'agriculture canadienne*. Adresse URL : <http://www.statcan.gc.ca/pub/95-640-x/2012002/00-fra.htm> (dernière consultation : juillet 2012).
- Steppuhn, 1981 – STEPPUHN, H. *Snow and Agriculture*. Dans, *Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use*. Male, D. H. et Gray, D. M. (édit.). Toronto (ON) : Pergamon Press Ltd.
- Stewart *et al.*, 2005 – STEWART, I. T., CAYAN, D. R. et DETTINGER, M. D. « Changes toward earlier streamflow timing across western North America », *Journal of Climate*, vol. 18, p. 1136-1155.
- Stewart et Sinclair, 2007 – STEWART, J. M. P. et SINCLAIR, A. J. « Meaningful public participation in environmental assessment: Perspectives from Canadian participants, proponents, and government », *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, vol. 9, n°2, p. 161-183.
- Stewart *et al.*, 2011 – STEWART, R., POMEROY, J. et LAWFORD, R. *A Drought Research Initiative for the Canadian Prairies*. Dans, *The 1999-2005 Canadian Prairies Drought: Science, Impact, and Lessons*. Stewart, R. et Lawford, R. (édit.). Winnipeg (MB) : Drought Research Initiative.
- Steyaert et Jiggins, 2007 – STEYAERT, P. et JIGGINS, J. « Governance of complex environmental situations through social learning: A synthesis of SLIMs lessons for research, policy and practice », *Environmental Science & Policy*, vol. 10, n°6, p. 575-586.
- Stoner *et al.*, 2012 – STONER, D., PENN, C., MCGRATH, J. et WARREN, J. « Phosphorus removal with by-products in a flow-through setting », *Journal of Environmental Quality*, vol. 41, n°3, p. 654-663.
- Sun *et al.*, 2009 – SUN, Y., LI, L., SCHULZE LAMMERS, P., ZENG, Q., LIN, J. et SCHUMANN, H. « A solar-powered wireless cell for dynamically monitoring soil water content », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 69, n°1, p. 19-23.
- Sutton *et al.*, 2011 – SUTTON, M. A., HOWARD, C. M., ERISMAN, J. W., BILLEN, G., BLEEKER, A., GRENNFELT, P., . . . , GRIZZETTI, B. (édit.). *The European Nitrogen Assessment*. New York (NY) : Cambridge University Press.
- Swanson *et al.*, 1997 – SWANSON, B., BENTZ, R. P. et SOFRANKO A.J. (édit.). *Improving Agricultural Extension. A Reference Manual*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Szeto *et al.*, 2008 – SZETO, K. K., LIU, J. et WONG, A. *Precipitation Recycling in the Mackenzie and Three Other Major River Basins*. Dans, *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience. Volume 1: Atmospheric Dynamics*. Woo, M. (édit.). Berlin, Allemagne : Springer-Verlag.

- Szeto *et al.*, 2011 – SZETO, K., HENSON, W., STEWART, R. et GASCON, G. « The catastrophic June 2002 Prairie rainstorm », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, n°4, p. 380-395.
- Talas-Oğraş, 2011 – TALAS-OĞRAŞ, T. « Risk assessment strategies for transgenic plants », *Acta Physiologiae Plantarum*, vol. 33, n°3, p. 647-657.
- Tangermann, 2010 – TANGERMANN, S. *The Economic and Trade Implications of Policy Responses to Societal Concerns. An Overview*. Dans, *Policy Responses to Societal Concerns in Food and Agriculture. Proceedings of an OECD Workshop*. Paris, France : OCDE.
- Tanriverdi, 2010 – TANRIVERDI, C. « Improved agricultural management using remote sensing to estimate water stress indices », *Applied Remote Sensing Journal*, vol. 1, n°2, p. 19-24.
- Taylor *et al.*, 2012 – TAYLOR, K. E., STOUFFER, R. J. et MEEHL, G. A. « An overview of CMIP5 and the experiment design », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, p. 485-498.
- Thobani, 1995 – THOBANI, M. *Tradable Property Rights to Water. How to Improve Water Use and Resolve Water Conflicts. FPD Note No. 34*. Washington (DC) : La Banque mondiale.
- Thornton, 2010 – THORNTON, P. K. « Livestock production: Recent trends, future prospects », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, p. 2853-2867.
- Tilman *et al.*, 2001 – TILMAN, D., FARGIONE, J., WOLFF, B., D'ANTONIO, C., DOBSON, A., HOWARTH, R., . . . SWACKHAMER, D. « Forecasting agriculturally driven global environmental change », *Science*, vol. 292, n°5515, p. 281-284.
- Tiner, 1993 – TINER, R. W. « Technical aspects of wetlands, wetland definitions and classifications in the United States », *United States Geological Survey Water Supply Paper*, vol. 2425.
- Tollefson et Wahab, 1996 – TOLLEFSON, L. C. et WAHAB, M. N. J. *Better Research-Extension-Farmer Interaction Can Improve the Impact of Irrigation Scheduling Techniques*. Saskatoon (SK) : Centre de recherche Canada-Saskatchewan sur la diversification de l'irrigation.
- Tompkins *et al.*, 2001 – TOMPKINS, J. A., SMITH, S. R., CARTMELL, E. et WHEATER, H. S. « *In-situ* bioremediation is a viable option for denitrification of Chalk groundwaters », *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 34, p. 111-125.
- TRAME, 2007 – TRAME. *Guide pratique: Objectif communication. Pour les agriculteurs qui veulent communiquer sur leurs territoires*. Paris, France : TRAME.

- Tress *et al.*, 2006 – TRESS, B., TRESS, G. et FRY, G. *Defining Concepts and the Process of Knowledge Production in Integrative Research*. Dans, *From Landscape Research to Landscape Planning. Aspects of Integration, Education and Application*. Tress, B., Tress, G., Fry, G. et Opdam, P. (édit.). Dordrecht, Pays-Bas : Springer.
- Trias *et al.*, 2004 – TRIAS, M., HU, Z., MORTULA, M. M., GORDON, R. J. et GAGNON, G. A. « Impact of seasonal variation on treatment of swine wastewater », *Environmental Technology*, vol. 25, n°7, p. 775-781.
- TRNEE, 2010a – TABLE RONDE NATIONALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉCONOMIE. *Courant de changement. La pérennité de l'eau et des secteurs des ressources naturelles du Canada*. Ottawa (ON) : TRNEE.
- TRNEE, 2010b – TABLE RONDE NATIONALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉCONOMIE. *Degrés de réchauffement : Les enjeux de la hausse du climat pour le Canada*. Ottawa (ON) : TRNEE.
- TRNEE, 2011 – TABLE RONDE NATIONALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉCONOMIE. *Cap sur l'eau : L'utilisation durable de l'eau par les secteurs des ressources naturelles du Canada*. Ottawa (ON) : TRNEE.
- Tropp, 2007 – TROPP, H. « Water governance: Trends and needs for new capacity development », *Water Policy*, vol. 9, n°2, p. 19-30.
- Turner *et al.*, 2004 – TURNER, K., GEORGIU, S., CLARK, R. et BROUWER, R. *Economic Valuation of Water Resources in Agriculture. From the Sectoral to a Functional Perspective of Natural Resource Management*. Rome, Italie : FAO Water Reports 27.
- Turrall *et al.*, 2011 – TURRAL, H., BURKE, J. et FAURÈS, J. M. *Climate Change, Water and Food Security. FAO Reports 36*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Tyrchniewicz et Tyrchniewicz, 2006 – TYRCHNIEWICZ, A. et TYRCHNIEWICZ, E. *Agriculture as Part of the Solution for Water Quality in Manitoba*. Ottawa (ON) : Canadian Fertilizer Institute, Keystone Agricultural Producers.
- UE, 1991 – UNION EUROPÉENNE. *Directive du conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (91/676/CEE)*. Bruxelles, Belgique: UE.
- UE, 1998 – UNION EUROPÉENNE. *Normes de l'UE sur l'eau potable*. Adresse URL : <http://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-ue-eau-potable.htm> (dernière consultation : avril 2012).
- UE. 2010 – UNION EUROPÉENNE. *La directive « Nitrates » de l'UE*. Bruxelles, Belgique : UE.

- UNESCO, 2009 – ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ÉDUCATION LA SCIENCE ET LA CULTURE. *L'eau dans un monde qui change. 3<sup>e</sup> rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*. Paris, France : UNESCO.
- UNESCO, 2012 – ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ÉDUCATION LA SCIENCE ET LA CULTURE. *Gérer l'eau dans des conditions d'incertitude et de risque. 4<sup>e</sup> édition du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*. Paris, France : UNESCO.
- Unilever, 2010 – UNILEVER. *Code de l'agriculture durable d'Unilever. Guide de mise en œuvre*. Londre, Royaume-Uni: Unilever.
- USDA, 2009 – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Agricultural Water Security Program. What is Agricultural Water Security?* Adresse URL : [http://www.csrees.usda.gov/nea/nre/in\\_focus/water\\_if\\_security.html](http://www.csrees.usda.gov/nea/nre/in_focus/water_if_security.html) (dernière consultation : mai 2012).
- USGS, 2008 – U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Consumptive Water Use in the Great Lakes Basin*. Adresse URL : <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3032/pdf/fs2008-3032.pdf> (dernière consultation : avril 2012).
- Valetta, 2010 – VALETTA, M. *Consumer Perception and GMOs in the European Union*. Dans, *Policy Responses to Societal Concerns in Food and Agriculture. Proceedings of an OECD Workshop*. Paris, France : OCDE.
- van Bochove *et al.*, 2010 – VAN BOCHOVE, E., THÉRIAULT, G., DENAULT, J.-T., DECHMI, F., ROUSSEAU, A. N. et ALLAIRE, S. E. *Phosphore*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Eilers, W., MacKay, R., Graham, L. et Lefebvre, A. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Van der Gulik *et al.*, 2000 – VAN DER GULIK, T. W., CHRISTL, L. H., COOTE, D. R., MADRAMOOTOO, C. A., NYVALL, T. J. et SOPUCK, T. J. V. *La gestion des surplus d'eau*. Dans, *La santé de l'eau. Vers une agriculture durable au Canada*. Coote, D. R. et Gregorich, L. J. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.
- van der Kamp *et al.*, 2003 – VAN DER KAMP, G., HAYASHI, M. et GALLÉN, D. « Comparing the hydrology of grassed and cultivated catchments in the semi-arid Canadian prairies », *Hydrological Processes*, vol. 17, p. 559-575.
- van Jaarsveld *et al.*, 2005 – VAN JAARSVELD, A., BIGGS, R., SCHOLES, R. J., BOHENSKY, E., REYERS, B., LYNAM, T., . . . FABRICIUS, C. « Measuring conditions and trends in ecosystem services at multiple scales: The Southern African Millennium Ecosystem Assessment (SAfMA) experience », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 360, n°1454, p. 425-441.



- Van Kessel *et al.*, 1999 – VAN KESSEL, J. S., THOMPSON, R. B. et REEVES, J. B. « Rapid on-farm analysis of manure nutrients using quick tests », *Journal of Production Agriculture*, vol. 12, n°2, p. 215-224.
- van Schilfhaarde, 1994 – VAN SCHILFGAARDE, J. « Irrigation - A blessing or a curse », *Agricultural Water Management*, vol. 25, p. 203-219.
- Varble et Chávez, 2011 – VARBLE, J. L. et CHÁVEZ, J. L. « Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado », *Agricultural Water Management*, vol. 101, n°1, p. 93-106.
- Veeman *et al.*, 1997 – VEEMAN, T. S., VEEMAN, M. M., ADAMOWICZ, W. L., ROYER, S., VINEY, B., FREEMAN, R. et BAGGS, J. *Conserving Water in Irrigated Agriculture: The Economics and Valuation of Water Rights. Rural Economy Project Report 97-01*. Edmonton (AB) : Département d'économie rurale, Université de l'Alberta.
- Verhoeven et Setter, 2010 – VERHOEVEN, J. T. A. et SETTER, T. L. « Agricultural use of wetlands: Opportunities and limitations », *Annals of Botany*, vol. 105, n°1, p. 155-163.
- Vijayakumar et Rosario, 2011 – VIJAYAKUMAR, S. et ROSARIO, J. N. *Preliminary Design for Crop Monitoring Involving Water and Fertilizer Conservation Using Wireless Sensor Networks*. Article présenté dans le cadre du IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN) 2011. Xi'an, Chine.
- Vymazal et Kröpfelová, 2010 – VYMAZAL, J. et KRÖPFELOVÁ, L. « Removal of nitrogen in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review », *Wetlands*, vol. 29, p. 1114-1124.
- Wagener *et al.*, 2004 – WAGENER, T., WHEATER, H. S. et GUPTA, H. V. *Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*. Londres, Royaume-Uni : Imperial College Press.
- Walker, 1989 – WALKER, W. R. *Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems. FAO Irrigation and Drainage Paper 45*. Rome, Italie : FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Wall et Smit, 2007 – WALL, E. et SMIT, B. *Farming in a Changing Climate: Agricultural Adaptation in Canada*. Vancouver (BC) : UBC Press.
- Walmart, 2010 – WALMART. *Global Sustainability Report. 2010 Progress Update*. Bentonville (AR) : Walmart.
- Wang *et al.*, 2001 – WANG, N., ZHANG, N., DOWELL, F. E., SUN, Y. et PETERSON, D. E. « Design of an optical weed sensor using plant spectral characteristics », *Transactions of the ASAE*, vol. 44, n°2, p. 409-419.

- Wang *et al.*, 2007 – WANG, Y., CHEN, X. et XIANG, C. B. « Stomatal density and bio-water saving », *Journal of Integrative Plant Biology*, vol. 49, n°10, p. 1435-1444.
- Wang *et al.*, 2009. WANG, F. X., FENG, S. Y., HOU, X. Y., KANG, S. Z. et HAN, J. J. « Potato growth with and without plastic mulch in two typical regions of Northern China », *Field Crops Research*, vol. 110, n°2, p. 123-129.
- Warren et Egginton, 2008 – WARREN, F. J. et EGGINTON, P. A. *Information de base : Concepts, aperçus, et approches. Dans, Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007.* Lemmen, D. S., Warren, F. J., Lacroix, J. et Bush, E. Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.
- Wassenaar *et al.*, 2006 – WASSENAAR, L. I., HENDRY, M. J. et HARRINGTON, N. « Decadal geochemical and isotopic trends for nitrate in a transboundary aquifer and implications for agricultural beneficial management practices », *Environmental Science & Technology*, vol. 40, n°15, p. 4626-4632.
- Weis *et al.*, 2008 – WEIS, M., GUTJAHR, C., RUEDA AYALA, V., GERHARDS, R., RITTER, C. et SCHÖLDERLE, F. « Precision farming for weed management: Techniques », *Gesunde Pflanzen*, vol. 60, n°4, p. 171-181.
- Welbaum *et al.*, 2004 – WELBAUM, G. E., STURZ, A. V., DONG, Z. et NOWAK, J. « Managing soil microorganisms to improve productivity of agro-ecosystems », *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 23, n°2, p. 175-193.
- Wenger *et al.*, 2002 – WENGER, E., MCDERMOTT, R. et SNYDER, W. M. *Cultivating Communities of Practice: A Guide to Managing Knowledge.* Watertown (MA) : Harvard Business School Press.
- Wheater *et al.*, 2008 – WHEATER, H., REYNOLDS, B., MCINTYRE, N., MARSHALL, M., JACKSON, B., FROGBROOK, Z., . . . CHELL, J. *Impacts of Upland Land Management on Flood Risk: Multi-Scale Modeling Methodology and Results from the Pontbren Experiment. FRMRC Research Report UR 16.* Manchester, Royaume-Uni : Flood Risk Management Research Consortium.
- Wheater et Evans, 2009 – WHEATER, H. et EVANS, E. « Land use, water management and future flood risk », *Land Use Policy*, vol. 26S, p. S251-S264.
- Wheater, 2009 – WHEATER, H. S. *Water Management for a Changing Climate; Challenges and Opportunities.* Article présenté dans le cadre du 18<sup>th</sup> Convocation of the International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences (CAETS2009). Calgary (AB).
- Wheaton *et al.*, 2008 – WHEATON, E., KULSHRESHTHA, S., WITTROCK, V. et KOSHIDA, G. « Temps arides : Les dures leçons des sécheresses canadiennes de 2001 et 2002 », *Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, vol. 52, n°2, p. 241-262.

- Wheaton. 2011 – WHEATON, E. *What Effects Do Droughts Have in Canada? Highlights of the Repercussions of a Major Multi-Year Drought*. Dans, *The 1999-2005 Canadian Prairies Drought: Science, Impacts, and Lessons*. Stewart, R. et Lawford, R. (édit.). Winnipeg (MB) : Drought Research Initiative.
- Whitford *et al.*, 2001 – WHITFORD, F., WOLT, J., NELSON, H., BARRETT, M., BRICHFORD, S. et TURCO, R. *Pesticides and Water Quality. Principles, Policies, and Programs*. West Lafayette (IN) : Perdue University Cooperative Extension Service, Perdue Pesticide Programs.
- Wichelns et Oster, 2006 – WICHELNS, D. et OSTER, J. D. « Sustainable irrigation is necessary and achievable, but direct costs and environmental impacts can be substantial », *Agricultural Water Management*, vol. 86, n°1-2, p. 114-127.
- Wiebe *et al.*, 2006 – WIEBE, B. H., EILERS, R. G., EILERS, W. D. et BRIERLEY, J. A. *The Presence and Extent of Moderate to Severe Soil Salinity on the Canadian Prairies*. Article présenté dans le cadre du Proceedings of the Manitoba Soil Science Society Annual Meetings. Winnipeg (MB).
- Wiebe *et al.*, 2010 – WIEBE, B. H., EILERS, W. D. et BRIERLEY, J. A. *Salinité du sol*. Dans, *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 3*. Eilers, W., MacKay, R., Graham, L. et Lefebvre, A. (édit.). Ottawa (ON) : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Williams, 2011 – WILLIAMS, B. K. « Adaptive management of natural resources — framework and issues », *Journal of Environmental Management*, vol. 92, p. 1346-1353.
- Wilson *et al.*, 2010 – WILSON, M. L., ROSEN, C. J. et MONCRIEF, J. F. « Effects of polymer-coated urea on nitrate leaching and nitrogen uptake by potato », *Journal of Environmental Quality*, vol. 39, n°2, p. 492-499.
- Wittwer, 1993 – WITTWER, S. H. « World-wide use of plastics in horticultural production », *HortTechnology*, vol. 3, p. 6-19.
- Wolf, 2012 – WOLF, T. *On-Farm Remediation of Pesticide Wastes Using Biobeds*. Adresse URL : <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1299082427931&lang=eng> (dernière consultation : juillet 2012).
- Wood *et al.*, 2008 – WOOD, J. D., GORDON, R., MADANI, A. et STRATTON, G. W. « A long term assessment of phosphorus treatment by a constructed wetland receiving dairy wastewater », *Wetlands*, vol. 28, n°3, p. 715-723.
- World Wildlife Fund, 2009 – WORLD WILDLIFE FUND. *Péril dans les eaux canadiennes. Les flux environnementaux et l'avenir des ressources d'eau douce au Canada*. Toronto (ON) : WWF-Canada.

- Worrall *et al.*, 2009 – WORRALL, F., SPENCER, E. et BURT, T. P. « The effectiveness of nitrate vulnerable zones for limiting surface water nitrate concentrations », *Journal of Hydrology*, vol. 370, n°1-4, p. 21-28.
- Xie *et al.*, 2005 – XIE, Z., WANG, Y. et LI, F. « Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of Northwest China », *Agricultural Water Management*, vol. 75, n°1, p. 71-83.
- Xoconostle *et al.*, 2010 – XOCONOSTLE-CAZARES, B., RAMIREZ-ORTEGA, F. A., FLORES-ELENES, L. et RUIZ-MEDRANO, R. « Drought tolerance in crop plants », *American Journal of Plant Physiology*, vol. 5, p. 241-256.
- Yates *et al.*, 2007 – YATES, A. G., BAILEY, R. C. et SCHWINDT, J. A. « Effectiveness of best management practices in improving stream ecosystem quality », *Hydrobiologia*, vol. 583, n°1, p. 331-344.
- Yiridoe *et al.*, 2010 – YIRIDOE, E. K., ATARI, D. O. A., GORDON, R. et SMALE, S. « Factors influencing participation in the Nova Scotia Environmental Farm Plan Program », *Land Use Policy*, vol. 27, n°4, p. 1097-1106.
- Yoder *et al.*, 2001 – YODER, D. C., CORWIN, B. K., MUELLER, T. C., HART, W. E., MOTE, C. R. et WILLS, J. B. « Development of a system to manage pesticide-contaminated wastewater », *Transactions of the ASAE*, vol. 44, n°4, p. 877-890.
- Young, 1996 – YOUNG, R. A. « Measuring economic benefits for water investments and policies », *World Bank Technical Paper*, vol. 338, p. 1-122.
- Young et Karkoski, 2000 – YOUNG, T. F. et KARKOSKI, J. « Green evolution: Are economic incentives the next step in nonpoint source pollution control? », *Water Policy*, vol. 2, p. 151-173.
- Young, 2008a – YOUNG, M. *Trading into and out of trouble Australian water allocation & trading experience*. Article présenté dans le cadre du Expo Zaragoza 2008. Zaragoza, Espagne.
- Young, 2008b – YOUNG, P. C. *Real-Time Flow Forecasting*. Dans, *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. Wheater, H., Sorooshian, S. et Sharma, K. D. (édit.). Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- Zerger *et al.*, 2010 – ZERGER, A., VISCARRA ROSSEL, R. A., SWAIN, D. L., WARK, T., HANDCOCK, R. N., DOERR, V. A. J., . . . LOBSEY, C. « Environmental sensor networks for vegetation, animal and soil sciences », *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 12, n°5, p. 303-316.
- Zhang *et al.*, 2011 – ZHANG, X., BROWN, R., VINCENT, L., SKINNER, W., FENG, Y. et MEKIS, E. *Tendances climatiques au Canada, de 1950 à 2007. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010. Rapport technique thématique n° 5*. Ottawa (ON) : Conseils canadiens des ministres des ressources.

- Zhao et Yang, 2010 – ZHAO, Y. Q. et YANG, Y. « Extending the use of dewatered alum sludge as a P-trapping material in effluent purification: Study on two separate water treatment sludges », *Journal of Environmental Science and Health Part A*, vol. 45, n°10, p. 1234-1239.
- Zhengbin *et al.*, 2011 – ZHENGBIN, Z., PING, X., HONGBO, S., MENGJUN, L., ZHENYAN, F. et LIYE, C. « Advances and prospects: Biotechnologically improving crop water use efficiency », *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 31, n°3, p. 281-293.
- Zhou *et al.*, 2011 – ZHOU, J., WANG, C., ZHANG, H., DONG, F., ZHENG, X., GALE, W. et LI, S. « Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat-summer maize cropping system », *Field Crops Research*, vol. 122, n°2, p. 157-163.
- Zwart *et al.*, 2010 – ZWART, S. J., BASTIAANSEN, W. G. M., DE FRAITURE, C. et MOLDEN, D. J. « A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat », *Agricultural Water Management*, vol. 97, n°10, p. 1617-1627.

## Évaluations du Conseil des académies canadiennes

### Les rapports d'évaluation ci-dessous peuvent être téléchargés depuis le site Web du CAC ([www.sciencepourlepublic.ca](http://www.sciencepourlepublic.ca)) :

- L'eau et l'agriculture au Canada : vers une gestion durable des ressources en eau (2013)
- Renforcer la capacité de recherche du Canada : la dimension de genre (2012)
- L'état de la science et de la technologie au Canada (2012)
- Éclairer les choix en matière de recherche : Indicateurs et décisions (2012)
- Nouvelles technologies et évaluation de la sécurité chimique (2012)
- Des animaux en santé, un Canada en santé (2011)
- La taxonomie canadienne : explorer la biodiversité, créer des possibilités (2010)
- Honnêteté, responsabilité et confiance : Promouvoir l'intégrité en recherche au Canada (2010)
- Meilleure recherche = Meilleur management (2009)
- La gestion durable des eaux souterraines au Canada (2009)
- Innovation et stratégies d'entreprise : pourquoi le Canada n'est pas à la hauteur (2009)
- Vision pour l'Initiative canadienne de recherche dans l'Arctique – Évaluation des possibilités (2008)
- La production d'énergie à partir des hydrates de gaz – potentiel et défis pour le Canada (2008)
- Petit et différent : perspective scientifique sur les défis réglementaires du monde nanométrique (2008)
- La transmission du virus de la grippe et la contribution de l'équipement de protection respiratoire individuelle – Évaluation des données disponibles (2007)
- L'État de la science et de la technologie au Canada (2006)

### Les évaluations suivantes fait présentement l'objet de délibérations de comités d'experts :

- Écologiser le Canada : le potentiel que recèlent les applications nouvelles et novatrices des technologies de l'information et des communications (TIC)
- Harnacher la science et la technologie pour comprendre les incidences environnementales liées à l'extraction du gaz de schiste
- Incidences médicales et physiologiques de l'utilisation des armes à impulsions
- Incidences socio-économiques des investissements dans l'innovation
- La compétitivité de l'industrie canadienne au regard de l'utilisation de l'énergie
- L'avenir des modèles canadiens de maintien de l'ordre
- Les prix énergétiques – Incidences et adaptation : Évaluer l'état de préparation du Canada

- Les produits thérapeutiques pour les enfants
- L'état de la culture scientifique au Canada
- L'état de la recherche-développement industrielle au Canada
- L'état des connaissances sur la sécurité alimentaire dans le Nord du Canada
- L'océanographie au Canada

## **Conseil des gouverneurs du Conseil des académies canadiennes\***

### **Elizabeth Parr-Johnston, C.M., présidente**

Ancienne rectrice de l'Université du Nouveau-Brunswick et ancienne rectrice de l'Université Mont Saint Vincent (Chester Basin, N.-É.)

### **Henry Friesen, C.C., MSRC, MACSS, vice-président**

Professeur émérite distingué et membre principal du Centre pour le progrès de la médecine, Faculté de médecine, Université du Manitoba (Winnipeg, MB)

### **Margaret Bloodworth, C.M.**

Ancienne sous-ministre au fédéral et conseillère nationale pour la sécurité (Ottawa, Ont.)

### **John Cairns, MACSS**

Professeur de médecine, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

### **Marie D'lorio, MSRC**

Directrice générale, Institut national de nanotechnologie, Conseil national de recherches (Edmonton, AB)

### **Claude Jean**

Premier vice-président et directeur général, Teledyne DALSA, Semiconducteur (Bromont, QC)

### **Tom Marrie, MACSS**

Doyen, Faculté de médecine, Université Dalhousie (Halifax, N.-É.)

### **Jeremy McNeil, MSRC**

Professeur invité Helen Battle, Département de biologie, Université Western (London, ON)

### **Axel Meisen, MACG**

Ancien président, Prévision, Alberta Innovates – Technology Futures (AITF) (Edmonton, AB)

### **P. Kim Sturgess, MACG**

Présidente-directrice générale et fondatrice, Alberta WaterSMART (Calgary, AB)

---

\* Toutes les affiliations citées sont en date de janvier 2013.



## **Comité consultative scientifique du Conseil des académies canadiennes\***

### **Tom Brzustowski, O.C., MSRC, MACG, président**

Président du conseil d'administration, Institut d'informatique quantique, Université de Waterloo (Waterloo, ON)

### **Susan A. McDaniel, MSRC, vice-présidente**

Titulaire de la chaire de recherche Prentice en démographie et économie mondiales, Professeure de sociologie, Université de Lethbridge (Lethbridge, AB)

### **Lorne Babiuk, O.C., MSRC, MACSS**

Vice President (Research), University of Alberta (Edmonton, AB)

### **Murray Campbell**

Premier responsable, Programme de recherche en analytique des affaires, Centre de recherche T.J. Watson d'IBM (Yorktown Heights, NY)

### **Marcel Côté**

Associé fondateur, SECOR inc. (Montréal, QC)

### **Clarissa Desjardins**

Ancienne présidente-directrice générale, Centre d'excellence en médecine personnalisée (Montréal, QC)

### **Jean Gray, C.M., MACSS**

Professeure émérite de médecine, Université Dalhousie (Halifax, NS)

### **John Hepburn, MSRC**

Vice-président à la recherche et aux affaires internationales, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, BC)

### **Greg S. Kealey, MSRC**

Former Provost and Vice President (Research), Université du Nouveau-Brunswick (Fredericton, NB)

---

\* Toutes les affiliations citées sont en date de janvier 2013.

**Daniel Krewski**

Professeur d'épidémiologie et de médecine communautaire, directeur scientifique du Centre R. Samuel McLaughlin d'évaluation du risque sur la santé des populations, Université d'Ottawa (Ottawa, ON)

**Avrim Lazar**

Ancien président et chef de la direction, Association des produits forestiers du Canada (Ottawa, ON)

**Norbert R. Morgenstern, C.M., MSRC, MACG**

Professeur émérite d'université en génie civil, Université de l'Alberta (Edmonton, AB)

**Sarah P. Otto, MSRC**

Professeure et directrice du Centre de recherche sur la biodiversité, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, BC)

**Robert Watson**

Conseiller scientifique en chef, ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales (Londres, Royaume-Uni)





Council of Canadian Academies  
Conseil des académies canadiennes

Conseil des académies canadiennes  
180, rue Elgin, bureau 1401  
Ottawa (Ontario) K2P 2K3  
Tél. : 613-567-5000  
[www.sciencepourlepublic.ca](http://www.sciencepourlepublic.ca)