



# Indicateur du risque de contamination de l'eau par l'azote

## Rapport sur les indicateurs agroenvironnementaux

### La durabilité environnementale de l'agriculture canadienne

Année de recensement 2021



Agriculture et  
Agroalimentaire Canada

Agriculture and  
Agri-Food Canada

Canada

## **Indicateur du risque de contamination de l'eau par l'azote**

Rapport sur les indicateurs agroenvironnementaux, Année de recensement 2021

Statut : Couverture nationale, 1981-2021

Auteurs: J. Y. Yang, C. F, Drury<sup>1</sup> et J. G. Liu

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, 2025

Version électronique disponible à [publications.gc.ca](https://publications.gc.ca)

AAFC no. 13350F

No. de catalogue A59-129/2026F-PDF

ISBN 978-0-660-98506-0

Also published in English under the title, Indicator of the Risk of Water Contamination by Nitrogen

Consultez les [Indicateurs agroenvironnementaux sur agriculture.canada.ca](https://indicateurs.agroenvironnementaux.sur.agriculture.canada.ca) pour obtenir des renseignements sur cet indicateur et d'autres indicateurs agroenvironnementaux.

Pour de plus amples renseignements, consultez le [www.agriculture.canada.ca](https://www.agriculture.canada.ca) ou composez sans frais le 1-855-773-0241.

## Table des matières

L'enjeu et son importance .....	1
L'indicateur .....	2
Catégories de risques de l'IRCE-N .....	5
Limites .....	6
Résultats et interprétation .....	7
Tendances provinciales et temporelles .....	8
Perte par lessivage des nitrates .....	13
Concentration des nitrates .....	16
Options d'intervention .....	17
Références .....	19

## Liste des figures

Figure 1 : Risque de contamination de l'eau par l'azote sur les terres agricoles canadiennes en 1981 (A) et en 2021 (B) .....	4
Figure 2 : Évolution du risque de contamination de l'eau par l'azote dans les terres agricoles au Canada, 1981 à 2021 .....	8

## Liste des tableaux

Tableau 1: Classification IROWC-N basée sur la perte annuelle d'azote et la concentration annuelle d'azote dans l'eau .....	2
Tableau 2 : Pourcentage (%) des terres agricoles dans les différentes classes de risque IROWC-N de 1981 à 2021 .....	10
Tableau 3 : Perte d'azote (Perte d'azote, kg N ha <sup>-1</sup> ) et concentration d'azote (concentration d'azote, mg N L <sup>-1</sup> ) hors la saison de croissance, pendant la saison de croissance et sur une base annuelle, de 1981 à 2021 .....	14
Tableau 4 nouveau : Eau de drainage (mm) hors la saison de croissance, pendant la saison de croissance et sur une base annuelle, de 1981 à 2021 .....	15

## L'enjeu et son importance

Les engrais azotés inorganiques, le fumier et les légumineuses (fixation biologique de l'azote) fournissent de l'azote (N), un élément nutritif essentiel pour la production agricole. Cependant, lors de pluies excessives durant la saison de croissance, les nitrates présents dans le sol peuvent se perdre par lessivage sous la zone racinaire de la culture ou par drainage souterrain, ce qui peut représenter un risque environnemental lorsque les concentrations ou les charges de nitrates dans les eaux de surface ou les eaux souterraines dépassent les recommandations relatives à l'environnement ou à l'eau potable. Des pertes de nitrates peuvent survenir toute l'année, mais la majorité des pertes d'eau et de nitrates se produisent habituellement hors de la saison de croissance, lorsqu'une partie des nitrates résiduels présents dans le sol après la récolte est lessivée à travers le profil de sol après des précipitations ou une fonte des neiges. Les concentrations élevées ou les charges de nitrates dans l'eau douce peuvent être toxiques pour les insectes aquatiques ou les poissons (Camargo *et al.*, 2005). Les algues et certaines autres plantes aquatiques utilisent l'azote (N) et le phosphore (P) comme nutriments, ce qui peut accélérer l'eutrophisation, appauvrir la teneur en oxygène de l'eau et avoir des effets négatifs sur la vie aquatique (Camargo *et al.*, 2005; Cooper *et al.*, 2015; Sevda *et al.*, 2018). L'eutrophisation soulève également d'autres questions sociales et économiques importantes, notamment le déclin des pêches, les problèmes de confiance du public et l'augmentation du fardeau réglementaire. Par exemple, le bassin hydrographique du lac Érié fournit de l'eau potable à plus de 11 millions de consommateurs, en plus de soutenir les économies locales dans les industries du tourisme, du transport maritime et de la pêche (Watson *et al.*, 2016). Les concentrations élevées de nitrates dans l'eau peuvent également être nocives pour la santé humaine si elles dépassent les recommandations pour l'eau potable ( $\geq 10 \text{ mg N L}^{-1}$ , ce qui est semblable à la recommandation de  $50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$  de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) (Ward *et al.*, 2018).

Les régions humides où les précipitations surpassent l'évapotranspiration (comme le centre ou l'est du Canada, ou le sud de la Colombie-Britannique) pourraient subir des pertes élevées par lessivage d'azote, tandis que les terres agricoles dans les régions plus arides des provinces des Prairies pourraient enregistrer des pertes négligeables lorsque les précipitations ou la fonte des neiges sont insuffisantes pour que l'eau et les nitrates s'infiltrent très profondément dans le profil du sol. Le type de sol peut également avoir une incidence sur le lessivage des nitrates, car la texture et le carbone organique du sol peuvent influencer la conductivité hydraulique (drainage) en milieu saturé d'un sol. De plus, le type de culture (annuelle ou vivace, légumineuses ou autres, besoins élevés ou faibles en azote) peut également avoir des effets sur la concentration des nitrates dans le sol, laquelle se répercute à son tour sur l'ampleur des pertes par lessivage.

## L'indicateur

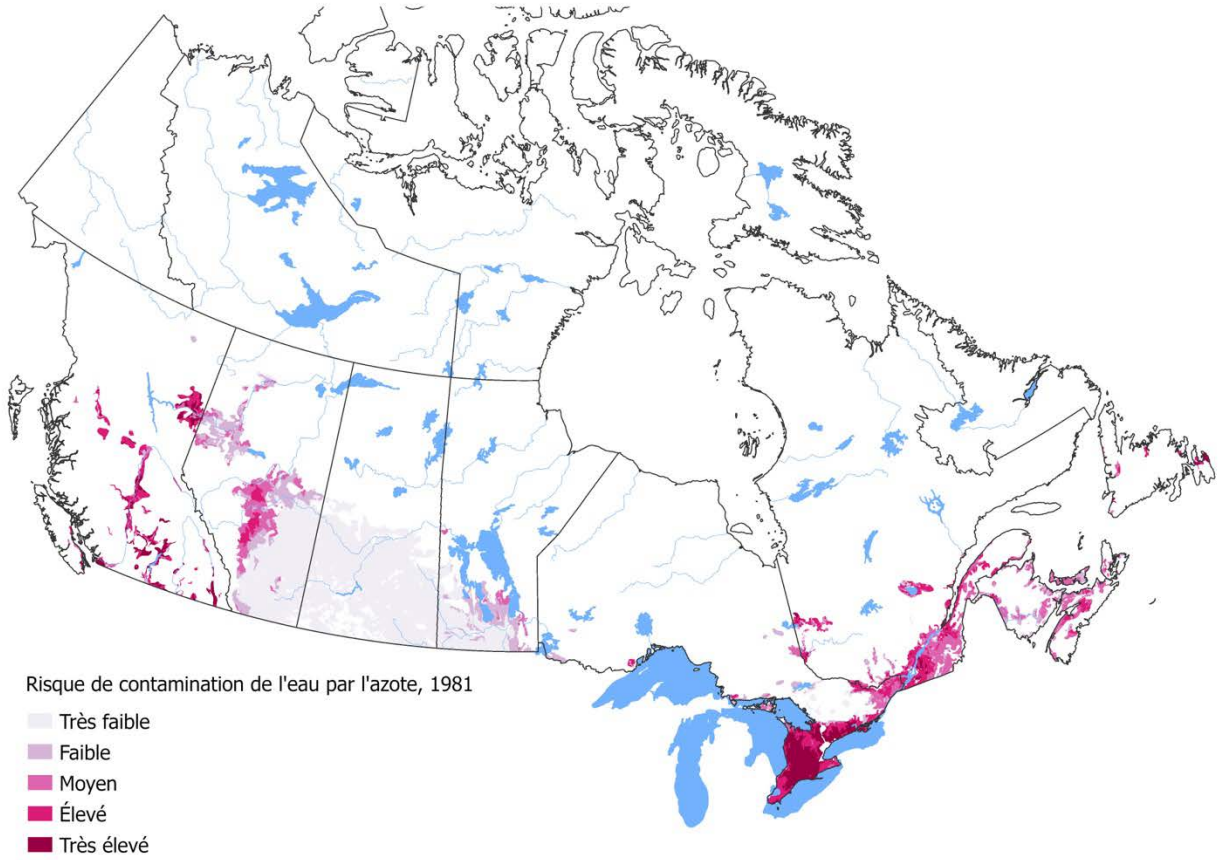
L'indicateur des risques de contamination de l'eau par l'azote nitrique (IRCE-N) fournit une estimation du risque de concentrations et de pertes élevées de nitrates dans les régions pédologiques et climatiques du Canada entre 1981 et 2021. Les niveaux de risque sont déterminés selon le système de classification décrit dans le tableau 1, et ils varient de très faible (niveau 1) à très élevé (niveau 5), avec les catégories intermédiaires de risque faible (niveau 2), modéré (niveau 3) et élevé (niveau 4) (figure 1). L'indicateur IRCE-N utilise les données de l'indicateur d'azote résiduel dans le sol (ARS), les données climatiques et les propriétés du sol et du paysage comme intrants du modèle (De Jong *et al.*, 2007, 2009; Yang *et al.*, 2007, 2013, 2023, 2024; Drury *et al.* 2007, 2010, 2016).

**Tableau 1: Classification IROWC-N basée sur la perte annuelle d'azote et la concentration annuelle d'azote dans l'eau.**

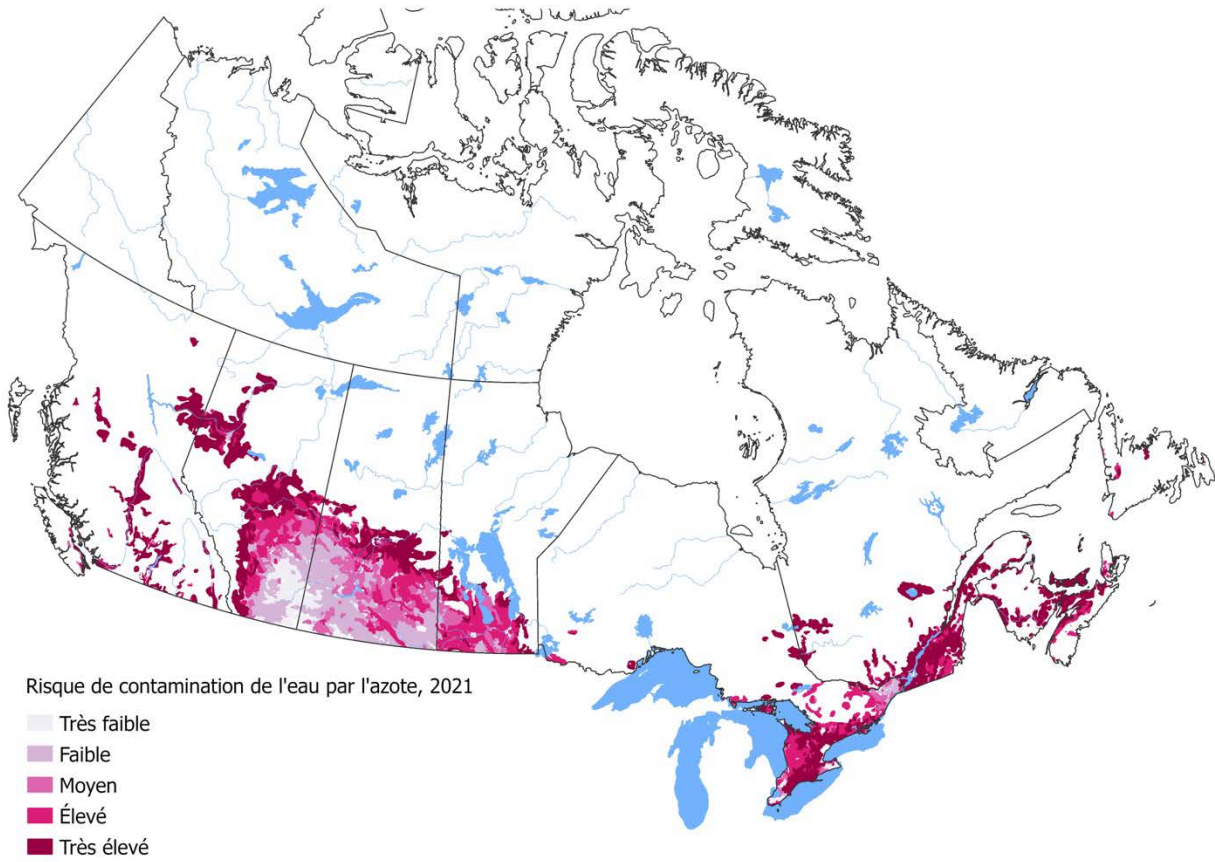
	Concentration annuelle d'azote (mg N/L)		
Pertes annuelles d'azote (kg N/ha)	0-4,9	5,0-9,9	≥10,0
0-4,9			
5-9,9			
10,0-19,9			
≥20,0			

Légende	Très élevé	Élevé	Modéré	Bas	Très bas
---------	------------	-------	--------	-----	----------



(A)



(B)

**Figure 1 : Risque de contamination de l'eau par l'azote sur les terres agricoles canadiennes en 1981 (A) et en 2021 (B)**

Les données mises à jour des apports et des pertes d'azote ont été intégrées à la version récente du modèle de bilan de l'azote réactif pour l'agriculture canadienne (CANBNr). Les données mises à jour sur les apports d'azote incluent : 1) les ventes provinciales d'engrais azoté de 2016 à 2021, avec huit sources d'engrais, de sorte que l'ensemble de données entier couvre les années 1981 à 2021, 2) les estimations de l'azote du fumier d'après la ration du bétail (Sheppard *et al.*, 2010, 2011; Yang *et al.*, 2023), 3) l'application de l'azote du fumier aux cultures prioritaires et 4) l'harmonisation des taux d'azote du fumier pour mieux rendre compte de l'azote dans le fumier appliqué. Les données mises à jour sur les pertes d'azote incluent: 1) l'estimation du rendement des pâturages de luzerne améliorés et non améliorés selon le modèle EPIC

pour la période 1981–2021 (Wang *et al.*, 2021) et 2) les émissions d’azote gazeux par dénitrification ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ) et la volatilisation de l’ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) pour la période 1981–2021 (se reporter aux chapitres sur les émissions de gaz à effet de serre et d’ammoniac pour plus de détails).

Le bilan hydrique IRCE-N a été mis à jour au moyen de simulations du modèle de dénitrification-décomposition (DNDC). Chaque année, le modèle DNDC produit des estimations mensuelles du drainage de 20 cultures annuelles à l’échelle des Pédopaysages du Canada (PPC) (les pâturages améliorés, les pâturages non améliorés, et les cultures de fourrage, de foin et de fruits et légumes ont été exclus). Le bilan hydrique DNDC moyen pondéré selon la surface cultivée à chaque PPC a ensuite été utilisé pour chacune des 27 cultures du modèle CANBNr. Le modèle utilise ces valeurs de drainage pondérées et l’ARS comme intrants pour calculer les pertes d’azote nitrique par lessivage et la concentration d’azote dans l’eau de lessivage (De Jong *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2014, 2023, 2024; Drury *et al.*, 2016). La concentration des nitrates et les pertes par lessivage de ceux-ci ont été calculées à la fois hors saison de croissance, qui comprend les mois d’octobre à avril, et durant la saison de croissance, qui comprend les mois de mai à septembre. On a utilisé les pertes et la concentration de N pour estimer les catégories de risques de l’indicateur IRCE-N décrites dans la section suivante.

Le module IRCE-N du modèle CANBNr fournit des renseignements essentiels du point de vue de la productivité d’une culture et du lessivage de l’azote dans le sol. Par exemple, un manque d’eau peut limiter la croissance des cultures, l’absorption des éléments nutritifs et le rendement, tandis que l’excès d’eau peut entraîner des émissions d’oxyde nitreux et des pertes de nitrates par lessivage, et nuire à l’absorption des nutriments et au rendement. Le module IRCE-N ne tient pas compte de la perte d’azote dans le ruissellement de surface, car on estime généralement que celles-ci sont faibles par rapport aux pertes d’azote par drainage souterrain et percolation profonde (De Jong *et al.*, 2009; Drury *et al.*, 1996, 2010, 2014, Woodley *et al.*, 2018). Les pertes de nitrates par drainage souterrain a une incidence sur la qualité des eaux de surface, tandis que les pertes de nitrates par percolation profonde a une incidence négative sur la qualité des eaux souterraines.

### Catégories de risques de l’IRCE-N

La quantité d’azote nitrique perdu et la concentration de celui-ci dans les eaux de drainage sont deux paramètres utilisés pour évaluer les catégories de l’IRCE-N, car elles sont toutes deux liées aux effets environnementaux potentiels des pertes d’azote. Quatre catégories de perte d’azote ( $\text{N}_{\text{perdu}}$ ) (0 à 4,9 kg N ha<sup>-1</sup>; 5 à 9,9 kg N ha<sup>-1</sup>; 10 à 19,9 kg N ha<sup>-1</sup> et  $\geq 20,0$  kg N ha<sup>-1</sup>) et trois catégories de concentration d’azote ( $\text{N}_{\text{conc}}$ ) (<

5,0 mg N L<sup>-1</sup>; 5 à 9,9 mg N L<sup>-1</sup> et > 10,0 mg N L<sup>-1</sup>) sont décrites dans la matrice des catégories de risques de l'indicateur IRCE-N (tableau 1). Les concentrations de nitrates dans l'eau de drainage < 5,0 mg N L<sup>-1</sup> sont conformes aux recommandations de qualité de l'eau pour la vie aquatique en eaux douces (4,7 mg NO<sub>3</sub>-N L<sup>-1</sup>), et les concentrations de nitrates comprises entre 5,0 et 9,9 mg N L<sup>-1</sup> se rapprochent des recommandations canadiennes de 10 mg N L<sup>-1</sup> (Guy, 2008) pour l'eau potable. Les niveaux de risque les plus élevés de 10 mg N L<sup>-1</sup> ou plus représentent les concentrations de nitrates ayant atteint ou dépassé les recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada.

## Limites

La méthodologie utilisée pour calculer l'indicateur IRCE-N est fondée sur les trois approximations principales suivantes, qui permettent de produire des rapports pour de grandes unités spatiales à une échelle temporelle grossière : 1) la valeur ARS est calculée chaque année comme un bilan azoté au moment de la récolte lorsque l'on suppose que l'azote organique dans le sol est à un niveau d'équilibre; 2) la perte d'azote est estimée hors période de croissance, durant sept mois (du 1<sup>er</sup> octobre au 30 avril), ainsi que durant la saison de croissance de cinq mois (du 1<sup>er</sup> mai au 30 septembre), car la plupart des cultures annuelles sont plantées en mai et atteignent leur maturité à la fin de septembre, même si certaines cultures comme le soja ou le maïs peuvent être récoltées en octobre et en novembre; 3) Un bilan hydrique pondéré en fonction de la superficie cultivée a été utilisé pour 27 cultures dans chaque polygone des PPC, car il est impossible de calculer le bilan hydrique pour chaque culture individuelle et pour chacun des 3 487 polygones des PPC. Il faut tenir compte de ces hypothèses pour interpréter les résultats.

Bien que des études aient été publiées sur la qualité de l'eau à l'échelle du champ ou du bassin hydrographique, les données disponibles sont insuffisantes pour valider les résultats pour chaque culture et pour chaque polygone au pays. Des comparaisons entre différentes écorégions et provinces et à l'échelle nationale, ainsi qu'au fil du temps sont néanmoins possibles pour repérer les points chauds. De plus, il est possible d'évaluer les tendances positives ou négatives des données de l'indicateur dans le temps. Les décideurs ou les consultants pourraient notamment utiliser les résultats de ces indicateurs pour déterminer les zones présentant un risque élevé d'accumulation potentielle d'ARS et de lessivage de l'azote. Les résultats devraient cependant être confirmés par des essais au champ, particulièrement dans les zones à risque élevé.

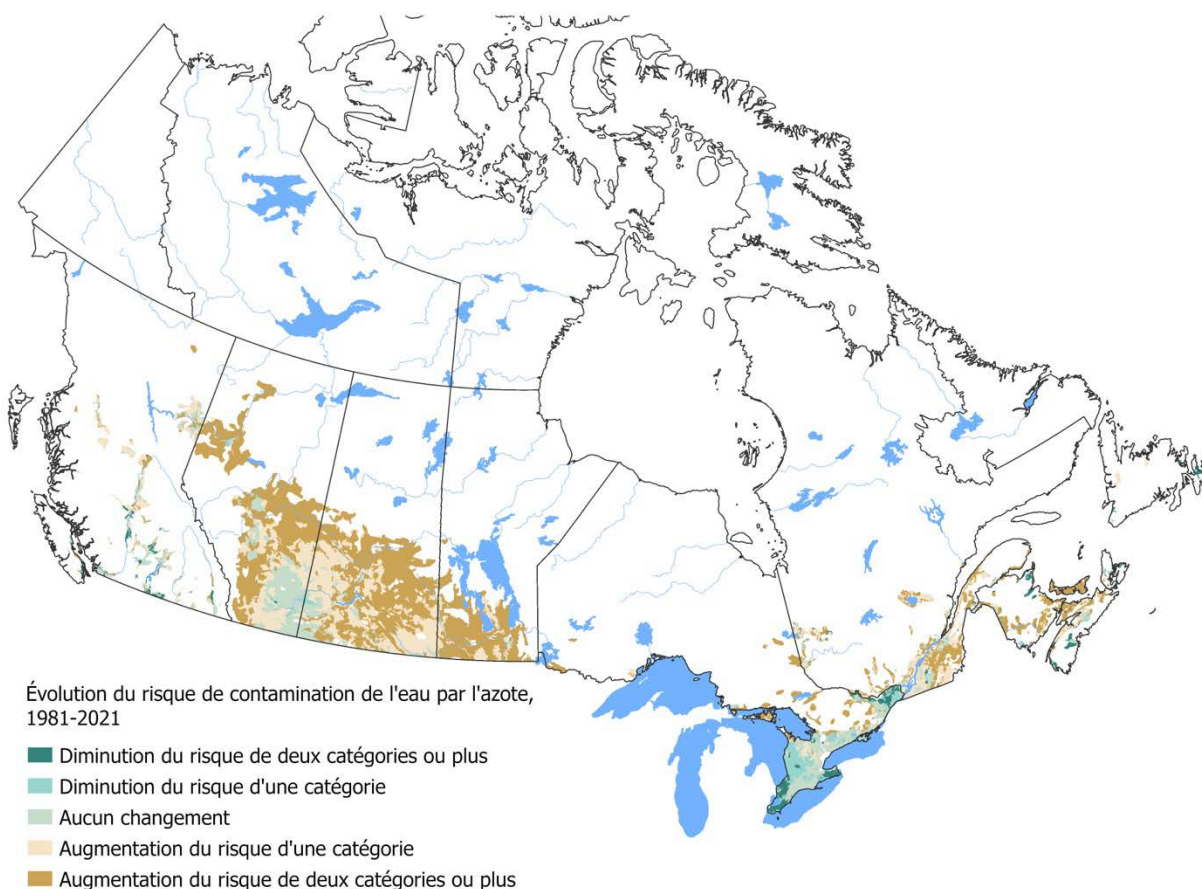
## Résultats et interprétation

### Tendance à l'échelle nationale

En 1981, la majorité des terres agricoles au Canada étaient dans la catégorie de risque très faible pour ce qui est de la contamination de l'eau par l'azote, en particulier dans les provinces des Prairies (Alberta, Saskatchewan et Manitoba), et dans les terres agricoles des régions du nord de l'Ontario (figure 1A). Timiskaming (Ontario) et certaines régions du Québec et des provinces de l'Atlantique se sont retrouvées dans les catégories de risque modéré à élevé. Le sud de l'Ontario et la Colombie-Britannique comptaient des zones de terres agricoles dans la catégorie de risque très élevé. En 2021, la superficie des terres agricoles de la catégorie de risque très faible a diminué considérablement dans les provinces des Prairies et est désormais également répartie dans les zones agricoles du sud de l'Alberta et du sud de la Saskatchewan. En Ontario, North Bay est passée de la catégorie de risque très faible en 1981 à la catégorie de risque modéré en 2021 (figures 1A et B). Il y a eu une augmentation notable des terres se trouvant dans les catégories de risque élevé et très élevé en Colombie-Britannique, dans l'ouest de l'Alberta et dans les régions du nord des Prairies, dans l'est du Manitoba, dans le sud et le nord de l'Ontario, au Québec et dans les provinces de l'Atlantique en 2021 (figure 1B). À l'échelle nationale, la proportion de terres agricoles dans la catégorie de risque très faible a diminué graduellement, passant de 69 % en 1981 à 13 % en 2021, tandis que la proportion de terres dans la catégorie de risque faible est passée de 9 % à 28 %, dans la catégorie de risque modéré, de 8 % à 16 %, dans la catégorie de risque élevé, de 8 % à 21 %, et dans la catégorie de risque très élevé, de 6 % à 20 % (tableau 2). Le changement survenu entre 2016 et 2021 a été aggravé par les conditions de sécheresse en 2021, qui ont entraîné une réduction des rendements et de l'absorption d'azote, ainsi qu'une augmentation de l'ARS après la récolte, comme nous l'avons mentionné dans le chapitre sur l'ARS.

Les changements dans les catégories de risque des terres agricoles entre 1981 et 2021 (figure 2) indiquent les régions où le risque de contamination de l'eau par les nitrates a augmenté, est resté stable ou s'est amélioré au fil du temps. Le risque de contamination de l'eau par l'azote est demeuré stable dans le sud de l'Alberta, le sud-ouest de la Saskatchewan et le sud de l'Ontario, mais il a augmenté d'une ou deux catégories dans le nord de la Colombie-Britannique, le nord de l'Alberta, le nord de la Saskatchewan, la majeure partie du Manitoba, le nord de l'Ontario et du Québec, au Nouveau-Brunswick et à l'Île-du-Prince-Édouard. Dans toutes les provinces, certaines régions ont connu une augmentation d'une catégorie de risque. En revanche, on a observé une diminution d'une ou deux catégories de risques dans des régions du sud de l'Ontario et de la Nouvelle-Écosse. Les changements de catégorie nationale de l'indicateur IRCE-N ont principalement eu lieu dans les provinces des Prairies, qui représentent la plus grande partie de la superficie agricole au Canada. Lors de la plupart des années de recensement, les faibles précipitations dans la majeure partie de l'Alberta et de la

Saskatchewan ont entraîné une diminution des volumes de drainage et des pertes de nitrates, ce qui a réduit le risque de contamination de l'eau par l'azote comparativement aux volumes relevés dans toutes les autres provinces.



**Figure 2 : Évolution du risque de contamination de l'eau par l'azote dans les terres agricoles au Canada, 1981 à 2021**

### Tendances provinciales et temporelles

De 1981 à 2021, on a relevé entre les provinces des différences importantes dans les catégories de l'indicateur IRCE-N (figure 1). Par exemple, en 1981, la majorité (83 % à 100 %) des terres agricoles des provinces des Prairies étaient associées aux catégories de risque très faible et faible, en partie parce qu'une large proportion de ces terres étaient en jachère d'été et recevaient un apport minimal d'azote, et parce que les précipitations avaient été faibles, ce qui a contribué à réduire les volumes d'eau de drainage par rapport aux volumes dans le reste du Canada (tableaux 2, 3 et 4). La proportion de terres dans ces deux catégories de risque a toutefois diminué considérablement pour s'établir à 41 % en Alberta, à 57 % en Saskatchewan et à

seulement 16 % au Manitoba en 2021 (tableau 2). Contrairement à la diminution des terres associées aux catégories de risque très faible et faible dans les provinces des Prairies, il y a eu des augmentations spectaculaires dans le cas des terres agricoles, dont 0 % à 3 % se trouvaient dans les catégories de risque élevé et très élevé en 1981, mais entre 24 % et 46 % dans ces mêmes catégories en 2021. Au cours des 41 dernières années, les terres agricoles dans la catégorie de risque modéré ont augmenté en Saskatchewan et au Manitoba, alors qu'elles ont généralement diminué dans toutes les autres provinces, sauf en Alberta, où les pourcentages ont demeuré relativement constants (tableau 2).

**Tableau 2 : Pourcentage (%) des terres agricoles dans les différentes classes de risque IROWC-N de 1981 à 2021**

Catégorie	Très bas									Bas									Modéré								
	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021
Colombie-Britannique	2	0	2	2	1	0	1	4	7	5	8	3	4	3	3	6	3	3	14	12	14	7	7	11	7	16	4
Alberta	64	84	68	46	36	43	42	48	20	19	9	16	20	33	10	16	17	21	13	5	11	13	10	22	16	14	12
Saskatchewan	100	100	100	96	53	59	54	56	12	0	0	0	3	37	21	8	20	45	0	0	0	1	8	17	23	10	18
Manitoba	77	16	14	16	0	6	4	17	1	19	25	52	16	7	15	2	3	15	4	46	29	41	8	11	13	12	38
Ontario	2	2	4	7	0	14	12	28	16	6	2	9	8	1	10	10	15	8	9	10	9	10	2	14	12	33	13
Québec	0	0	0	0	0	0	0	1	1	5	5	1	2	0	0	1	2	1	35	17	14	16	1	18	9	8	1
Nouveau-Brunswick	2	0	0	2	0	0	1	0	0	30	33	4	12	4	2	4	2	1	59	23	53	41	2	34	61	4	0
Nouvelle-Écosse	0	0	0	2	0	0	1	1	0	11	7	6	13	1	1	6	0	1	53	23	9	59	1	19	36	17	7
Île-du-Prince-Édouard	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	45	0	0	0	0	0	0	0	70	10	6	20	0	0	56	0	0
Terre-Neuve et Labrador	0	0	0	12	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	27	1	7	15	3	1	7	4	5
Canada	69	70	65	57	34	40	37	43	13	9	6	11	10	27	15	10	15	28	8	8	8	11	8	17	18	13	17

Catégorie	Élevé									Très élevé								
	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021
Colombie-Britannique	38	34	34	27	11	15	17	14	8	40	45	46	59	77	69	67	61	76
Alberta	3	1	4	17	13	19	18	16	20	0	0	0	2	6	4	8	5	26
Saskatchewan	0	0	0	0	2	3	9	12	15	0	0	0	0	0	0	5	2	10
Manitoba	0	12	5	26	46	50	10	36	35	0	0	0	1	39	18	71	31	11
Ontario	33	35	37	24	18	45	33	14	40	50	50	42	52	80	17	33	10	24
Québec	54	49	50	46	50	67	68	47	27	5	28	34	36	49	14	21	41	69
Nouveau-Brunswick	10	33	41	37	60	53	33	48	27	0	10	2	7	33	10	0	45	62
Nouvelle-Écosse	34	68	79	25	76	76	50	63	48	1	2	5	0	19	2	3	15	34
Île-du-Prince-Édouard	0	45	72	58	25	75	44	55	24	0	0	22	23	75	25	0	46	76
Terre-Neuve et Labrador	24	34	33	25	50	31	31	25	34	35	57	42	48	47	56	54	64	14
Canada	8	8	8	13	14	20	17	18	21	6	7	6	8	17	7	17	10	20

<sup>1</sup>Pour les cinq catégories, le nombre total est ≤ 100 (%) parce que la superficie agricole n'a pas été évaluée (%) dans chaque province. Les zones non évaluées représentaient de 1 % à 6 % de la superficie totale en Colombie-Britannique, < 1 % dans les provinces des Prairies, < 3 % au Nouveau-Brunswick, de 3 % à 7 % en Nouvelle-Écosse et jusqu'à 29 % à Terre-Neuve-et-Labrador en raison d'un manque de données sur le bilan hydrique.

En 1981, 21 % des terres agricoles de la Colombie-Britannique étaient associées aux catégories de risque très faible, faible et modéré, et 78 %, aux catégories de risque élevé et très élevé (il convient de noter que 1 à 3 % de la superficie agricole de la Colombie-Britannique n'a pas pu être évaluée en raison d'un manque de données sur le drainage). Cependant, en 2021, la superficie dans les catégories de risque élevé et très élevé a plus que doublé, pour atteindre 84 % de l'ensemble des terres agricoles (tableau 2).

L'Ontario a connu une tendance inverse à celle de la Colombie-Britannique et des provinces des Prairies, et on observe dans l'ensemble une amélioration et une réduction des catégories de risque élevé et très élevé au fil du temps. En Ontario, la proportion des terres agricoles dans les catégories de risque très faible et faible variait de 1 % à 15 % au cours des cinq années de recensement (1981 à 2001), et a augmenté entre 26 % et 35 % au cours des années de recensement 2016 et 2021 (tableau 2). À l'inverse, la proportion des terres agricoles dans les catégories de risque élevé et très élevé variait de 76 à 98 % au cours des cinq années de recensement (1981 à 2001), et elle a diminué entre 24 % et 64 % au cours des années de recensement 2016 et 2021. La catégorie de risque modéré concerne entre 9 % et 15 % des terres dans la plupart des années de recensement, sauf en 2001 et en 2016, où la proportion était de 2 % et de 32 %, respectivement (tableau 2). Les rendements culturaux plus élevés et l'absorption accrue d'azote dans le sud-ouest de l'Ontario étaient en partie responsables de l'augmentation de la superficie dans les catégories de risque très faible, faible et modéré au fil du temps. Il y a toutefois eu un renversement en 2021 en raison des conditions de sécheresse. Au Québec, en 1981, moins de 5 % des terres cultivées étaient associées aux catégories de risques très faible et faible, tandis que la proportion de la superficie des terres associées à la catégorie de risque modéré était de 35 %. En 2021, seulement 3 % de la superficie des terres du Québec se trouvaient dans les trois catégories de risque les plus faibles, 27 %, dans la catégorie de risque élevé, et 69 %, dans la catégorie de risque très élevé.

Pour toutes les années de recensement, la proportion de terres cultivées dans la catégorie de risque très faible était très petite dans les quatre provinces de l'Atlantique (0 % à 12 %) (tableau 2). En 1981, les provinces du Nouveau-Brunswick et de l'Île-du-Prince-Édouard comptaient toutes deux 30 % de leurs terres dans la catégorie de risque faible, et en 2021, il n'y avait plus que 1 % des terres dans cette catégorie au Nouveau-Brunswick et 0 % à l'Île-du-Prince-Édouard. En 1981, la majorité des terres du Nouveau-Brunswick, de la Nouvelle-Écosse et de l'Île-du-Prince-Édouard appartenaient à la catégorie de risque modéré (52 % à 70 %), et il y a eu des diminutions spectaculaires au fil du temps, ce qui a donné un pourcentage de 7 % ou moins en 2021 dans les provinces de l'Atlantique. Au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse et

à l'Île-du-Prince-Édouard, la proportion de terres dans les catégories de risque élevé et très élevé a augmenté au fil du temps, avec 83 à 100 % des terres agricoles dans ces deux catégories de risques les plus élevés en 2021, tandis qu'à Terre-Neuve-et-Labrador, 59 % des terres agricoles se trouvaient dans ces deux catégories en 1981 et 48 % en 2021.

### **Perte par lessivage des nitrates**

Comme prévu, la perte d'azote au Canada hors saison de croissance de sept mois était constamment supérieure à celle enregistrée durant la saison de croissance de 5 mois, en partie en raison des pertes d'évapotranspiration plus faibles lors de cette saison et de sa plus longue durée (tableau 3A). En 1981, par exemple, la perte d'azote au pays était de 5,3 kg N ha<sup>-1</sup> hors saison de croissance, contre 1,6 kg N ha<sup>-1</sup> durant la saison de croissance. De même, en 2021, les pertes d'azote étaient plus importantes hors saison de croissance (8,1 kg N ha<sup>-1</sup>) que durant la saison de croissance (6,3 kg N ha<sup>-1</sup>) en raison de l'augmentation du ruissellement par le drainage souterrain alors observé.

**Tableau 3 : Perte d'azote (Perte d'azote, kg N ha<sup>-1</sup>) et concentration d'azote (concentration d'azote, mg N L<sup>-1</sup>) hors la saison de croissance, pendant la saison de croissance et sur une base annuelle, de 1981 à 2021**

Nombre	3A - Perte d'azote (kg N ha <sup>-1</sup> )	Perte d'azote – Hors saison de croissance										Perte d'azote – Saison de croissance										Perte d'azote – Annuel									
		Année	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021		
1	Colombie-Britannique	24,8	19,6	23,9	19,6	30,2	28,4	21,7	30,8	38,5	4,5	7,2	5,7	12,0	12,3	5,1	14,9	6,1	19,3	29,3	26,8	29,7	31,6	42,5	33,5	36,6	36,8	57,8			
2	Alberta	2,5	1,2	1,4	1,4	1,8	3,3	2,1	3,5	3,8	1,5	1,6	2,6	3,6	3,0	3,7	5,1	2,7	8,1	4,0	2,8	4,0	5,0	4,7	7,0	7,2	6,2	11,9			
3	Saskatchewan	0,0	0,0	0,0	0,3	1,5	3,4	3,1	2,8	2,6	0,0	0,0	0,0	0,5	0,8	2,6	4,5	1,1	4,9	0,0	0,1	0,0	0,7	2,3	6,1	7,6	3,9	7,5			
4	Manitoba	2,5	5,1	1,3	3,3	11,3	6,7	11,3	10,6	6,6	1,4	3,3	3,2	4,4	6,5	7,0	14,4	5,1	5,2	3,9	8,5	4,5	7,6	17,8	13,8	25,7	15,7	11,9			
5	Ontario	22,4	24,7	20,2	21,5	38,3	18,7	17,9	10,9	19,2	5,6	6,6	2,7	5,1	8,6	1,7	4,5	1,5	2,7	27,9	31,4	22,9	26,6	46,9	20,4	22,4	12,4	21,9			
6	Québec	28,1	30,5	38,8	32,8	45,8	41,6	41,5	38,4	49,6	6,5	11,9	5,9	7,1	9,5	7,1	9,7	9,8	9,0	34,6	42,4	44,7	39,8	55,3	48,7	51,2	48,2	58,5			
7	Nouveau-Brunswick	20,1	21,2	29,9	25,7	35,0	39,3	26,7	41,2	52,2	3,5	6,3	4,9	4,0	6,5	6,5	5,8	8,6	10,7	23,6	27,5	34,8	29,7	41,4	45,8	32,4	49,8	62,9			
8	Nouvelle-Écosse	23,4	24,7	27,2	23,5	35,3	38,0	28,0	36,3	42,7	3,6	5,1	4,6	4,2	5,8	6,4	4,5	4,2	6,2	27,0	29,8	31,8	27,6	41,1	44,4	32,5	40,6	48,9			
9	Île-du-Prince-Édouard	21,0	21,5	30,7	33,2	45,8	50,8	25,4	56,3	75,8	3,0	3,0	3,5	4,6	6,9	7,3	4,3	6,2	11,0	24,0	24,5	34,2	37,9	52,7	58,1	29,7	62,5	86,8			
10	Terre-Neuve et Labrador	60,0	59,1	54,3	55,6	63,7	75,2	65,6	62,4	37,7	8,9	11,6	15,0	10,6	12,3	12,5	14,1	13,4	7,5	68,8	70,7	69,3	66,3	76,1	87,6	79,7	75,8	45,2			
11	Canada	5,3	5,1	4,8	4,8	8,6	7,7	7,2	7,0	8,1	1,6	2,2	1,8	2,8	3,4	3,6	6,1	2,5	6,3	6,9	7,3	6,6	7,6	12,0	11,3	13,3	9,6	14,3			

Nombre	3B - Concentration d'azote (mg N L <sup>-1</sup> )	Concentration d'azote – Hors saison de croissance										Concentration d'azote – Saison de croissance										Concentration d'azote – Annuel									
		Année	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021		
1	Colombie-Britannique	11,8	15,4	12,5	20,1	22,5	17,3	20,7	14,4	29,7	8,8	10,7	8,8	12,7	14,4	14,0	11,3	10,2	16,7	10,6	12,5	10,9	14,2	17,8	16,2	13,8	12,8	20,8			
2	Alberta	4,9	3,0	5,5	9,4	12,9	9,4	12,4	7,9	19,8	3,9	1,9	3,8	7,7	11,1	7,0	9,1	6,1	15,5	4,3	2,2	4,2	8,1	12,9	7,8	9,7	7,0	16,6			
3	Saskatchewan	0,1	0,1	0,1	2,8	9,0	6,0	8,0	9,1	25,1	0,0	0,1	0,1	2,6	7,0	4,4	5,1	8,3	22,6	0,1	0,1	0,1	2,7	8,8	5,1	5,9	8,8	23,3			
4	Manitoba	5,0	9,6	16,1	18,8	20,7	17,3	20,8	18,8	32,9	4,2	7,6	14,1	15,9	16,7	12,8	11,6	15,4	29,7	4,6	8,6	14,6	16,8	18,9	14,3	14,2	17,2	31,0			
5	Ontario	13,1	14,9	13,7	14,5	14,6	8,8	10,3	6,5	8,6	9,4	10,4	11,8	11,2	8,9	7,6	7,3	5,6	6,9	12,0	13,3	13,4	13,6	12,9	8,6	9,4	6,3	8,1			
6	Québec	7,6	12,6	9,8	10,6	12,8	8,4	10,7	12,8	15,0	3,4	4,9	6,0	6,0	6,7	3,8	4,4	6,4	9,2	6,0	8,6	8,8	9,0	10,9	7,1	8,3	10,1	12,9			
7	Nouveau-Brunswick	3,7	7,2	5,9	5,8	9,9	7,4	6,0	11,7	14,5	1,5	3,1	2,7	3,2	5,7	3,2	2,2	6,1	7,5	3,0	5,4	5,0	5,2	8,8	6,2	4,5	9,9	12,2			
8	Nouvelle-Écosse	5,1	7,6	8,9	6,4	9,3	7,4	5,9	7,3	9,7	2,8	4,4	5,5	3,8	5,9	3,3	3,1	4,7	5,8	4,6	6,7	8,3	5,7	8,6	6,2	5,2	6,9	8,9			
9	Île-du-Prince-Édouard	3,9	6,4	8,7	8,1	13,0	9,6	5,6	11,8	16,0	1,9	4,4	6,0	4,9	8,2	4,7	2,8	7,6	8,5	3,4	6,0	8,3	7,4	12,1	8,5	4,9	11,2	14,3			
10	Terre-Neuve et Labrador	8,8	13,7	15,1	12,3	12,9	14,0	15,1	15,0	7,7	3,1	6,0	5,3	5,5	5,0	6,1	6,4	6,3	2,9	7,1	10,8	9,8	9,9	9,5	11,7	11,9	11,6	5,8			
11	Canada	4,0	4,2	5,3	8,2	12,4	8,8	11,2	9,7	22,4	2,9	2,8	4,2	6,7	9,6	6,5	7,3	8,0	18,9	3,5	3,5	4,7	7,3	11,7	7,5	8,5	9,0	20,0			

**Tableau 4 nouveau : Eau de drainage (mm) hors la saison de croissance, pendant la saison de croissance et sur une base annuelle, de 1981 à 2021**

Nombre	Catégorie	Hors saison de croissance – drainage									Saison de croissance – drainage									Annuel – drainage								
		1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021
1	Colombie-Britannique	254	176	232	153	164	190	141	249	214	70	92	80	107	97	46	143	67	119	324	268	313	260	261	237	284	316	333
2	Alberta	36.3	33	20	11	10	34	17	32	16	42.6	64	59	38	22	55	59	36	51	78,9	97	79	49	32	89	76	67	67
3	Saskatchewan	12	18	8	6	15	59	31	24	11	4	34	50	17	9	65	81	14	23	15	52	58	23	24	124	112	38	34
4	Manitoba	55	58	11	21	59	47	57	68	23	37	46	28	30	43	58	123	37	20	93	103	39	51	102	105	179	104	43
5	Ontario	197	191	191	181	275	254	213	205	265	87	107	34	65	104	42	84	37	63	285	298	226	246	378	296	297	241	328
6	Québec	384	258	413	343	364	507	400	340	363	211	262	128	152	154	209	235	168	105	595	520	541	495	518	716	636	508	468
7	Nouveau-Brunswick	580	326	512	452	357	532	451	354	330	243	196	186	145	116	206	269	144	137	822	523	698	597	473	738	720	498	466
8	Nouvelle-Écosse	470	332	342	417	377	492	470	486	413	142	137	106	166	98	195	148	87	105	612	469	448	583	475	687	618	573	517
9	Île-du-Prince-Édouard	544	342	373	433	357	532	462	491	480	164	69	64	102	86	157	157	84	131	709	411	437	534	443	688	619	575	611
10	Terre-Neuve et Labrador	586	426	376	473	546	485	438	409	269	282	192	240	186	250	185	237	204	177	868	618	617	659	796	671	676	613	446
11	Canada	71	60	54	46	62	94	68	69	58	41	64	54	38	34	66	88	34	41	112	123	108	84	96	160	156	102	99

Les pertes d'azote hors saison de croissance étaient toujours plus faibles dans les trois provinces des Prairies en raison des faibles volumes de drainages dans ces régions plus arides que toutes les autres provinces en 1981 (fourchette de 0 à 2,5 kg N ha<sup>-1</sup>) et en 2021 (2,6 à 6,6 kg N ha<sup>-1</sup>) (tableaux 3 et 4). En comparaison, en 1981, les autres provinces ont affiché hors saison de croissance des pertes allant de 20,1 kg N ha<sup>-1</sup> au Nouveau-Brunswick à 60,0 kg N ha<sup>-1</sup> à Terre-Neuve-et-Labrador. En 2021, les pertes d'azote hors saison de croissance dans les provinces à l'extérieur des Prairies variaient de 19,2 kg N ha<sup>-1</sup> en Ontario à 75,8 kg N ha<sup>-1</sup> à l'Île-du-Prince-Édouard. La tendance des pertes d'azote à la baisse dans les Prairies et à la hausse dans toutes les autres provinces hors saison de croissance était également apparente durant la saison de croissance pour toutes les années (tableau 3A).

Les pertes annuelles totales au Canada ont généralement augmenté, passant de 6,9 kg N ha<sup>-1</sup> en 1981 à 14,3 kg N ha<sup>-1</sup> en 2021, bien qu'il soit à noter qu'en 2016, des valeurs inférieures de l'ARS ont contribué à réduire les pertes par lessivage (9,6 kg N ha<sup>-1</sup>) (tableau 3A). Les pertes annuelles d'azote étaient beaucoup moins importantes dans les provinces des Prairies en 1981 (0 à 4,0 kg N ha<sup>-1</sup>) et en 2021 (7,5 à 11,9 kg N ha<sup>-1</sup>). Par contre, en 2021, les pertes d'azote dans les autres provinces étaient considérablement plus importantes que dans les Prairies et ont varié de 23,6 à 68,8 kg N ha<sup>-1</sup> en 1981 et de 21,9 à 86,8 kg N ha<sup>-1</sup> dans le reste du Canada (tableau 3A). La perte annuelle d'azote par lessivage relativement faible (0,0 à 11,9 kg N ha<sup>-1</sup>) en Alberta et en Saskatchewan au cours de la période de 40 ans (tableau 3A) était principalement attribuable aux faibles volumes annuels de drainage, qui avaient varié de 15 à 124 mm (tableau 4). Le drainage annuel plus important au Manitoba (de 39 à 179 mm) a donné lieu à des estimations plus élevées des pertes d'azote par lessivage (de 3,9 à 25,7 kg N ha<sup>-1</sup>) au cours de cette période (tableau 3A). Les pertes d'eau de drainage étaient considérablement plus importantes (411 à 868 mm) dans le Canada atlantique au cours de la plupart des années, comparativement aux pertes dans les autres provinces, bien que des pertes de drainage relativement élevées (226 à 716 mm) aient également été observées en Ontario, au Québec et en Colombie-Britannique (tableau 4).

### **Concentration des nitrates**

La concentration d'azote nitrique dans les eaux de drainage était généralement plus élevée hors saison de croissance que durant celle-ci (tableau 3B). En 1981, les concentrations d'azote hors saison de croissance variaient de 0,1 mg N L<sup>-1</sup> en Saskatchewan (en raison d'un drainage pratiquement nul) à 13,1 mg N L<sup>-1</sup> en Ontario (tableau 3B). En 2021, les concentrations d'azote nitrique dans les eaux de drainage étaient considérablement plus élevées dans toutes les provinces sauf l'Ontario et Terre-Neuve-et-Labrador, allant de 7,7 mg N L<sup>-1</sup> à Terre-Neuve-et-Labrador à 32,9 mg N L<sup>-1</sup>

au Manitoba. En 1981, la concentration d'azote durant la saison de croissance variait de 0,0 mg N L<sup>-1</sup> en Saskatchewan à 9,4 mg N L<sup>-1</sup> en Ontario, mais elle s'échelonnait de 2,9 mg N L<sup>-1</sup> à Terre-Neuve-et-Labrador à 29,7 mg N L<sup>-1</sup> au Manitoba en 2021. On observe une tendance semblable pour les concentrations annuelles d'azote, avec une fourchette comprise entre 0 et 16,2 mg N L<sup>-1</sup> en 1981 et entre 6,4 mg N L<sup>-1</sup> à Terre-Neuve-et-Labrador et 14,4 mg N L<sup>-1</sup> au Manitoba en 2021. La concentration moyenne d'azote dans sept des dix provinces a alors atteint ou dépassé la recommandation pour l'eau potable, qui est de 10 mg N L<sup>-1</sup> (tableau 3B).

## Options d'intervention

Les grandes concentrations d'azote résiduel dans le sol au moment de la récolte, des sols ayant une faible capacité de rétention de l'eau, et des taux élevés de précipitations ou de fonte des neiges sont des facteurs qui contribuent aux pertes d'azote nitrique par lessivage dans les sols situés sous la zone racinaire. L'azote nitrique se déplaçant sous la zone racinaire peut atteindre les eaux de surface par le drainage souterrain ou par les eaux souterraines, ce qui peut avoir des répercussions sur les aquifères et les puits d'eau potable dans les collectivités rurales. L'azote nitrique peut être lessivé depuis le sol si les précipitations dépassent l'évapotranspiration. Les quatre principales options de gestion pour réduire la concentration et les pertes de nitrates dans les eaux de drainage sont les suivantes :

1. Réduire la quantité d'ARS resté dans le sol après la récolte. Les options de gestion, notamment les pratiques de gérance des nutriments 4B (bonne source, bonne dose, bon moment, bon emplacement), par exemple l'utilisation d'engrais à efficacité accrue comme ceux contenant de l'uréase et des inhibiteurs de nitrification, un meilleur épandage par injection (Drury *et al.*, 2017; Woodley *et al.*, 2020), des systèmes d'injection à double sillon (Drury *et al.*, 2024) et des tests diagnostiques en saison (Zebarth *et al.*, 2009) participent à l'atténuation des pertes d'azote dans l'environnement.
2. Utiliser une culture de couverture pour capter tout l'azote résiduel dans le sol. L'azote capté peut alors être disponible pour la culture de l'année suivante si le moment de la décomposition des résidus et de la libération de l'azote par la culture de couverture correspond à ses besoins. Par exemple, du blé d'hiver comme culture de couverture a réduit la concentration de nitrates dans les eaux de drainage souterrain de 21 % à 38 % et les pertes de nitrate de 14 % à 16 % par rapport aux traitements sans cultures de couverture (Drury *et al.*, 2014).

3. Utiliser des pratiques agricoles de conservation, comme des rotations de cultures améliorées (Agomoh *et al.*, 2011), en vue d'accroître la séquestration du carbone organique dans le sol, qui améliore à son tour la structure du sol et sa capacité de rétention de l'eau.
4. Capturer les pertes en bordure des champs au moyen de milieux humides ou de bandes végétatives filtrantes (Walton *et al.*, 2020).

## Références

- Agomoh, I.V., Drury, C.F., Yang, X.M., Phillips, L.A. et W. D. Reynolds. 2021. Crop rotation enhances soybean yields and soil health indicators. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (sous presse, février 2021).
- Camargo, J.A., Alonso, A. et Salamanca, A. 2005. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates. *Chemosphere* 58: 1255-1267.
- Cooper, M.J., Costello, G.M., Francoeur, S.N. et Lamberti, G.A. 2015. Nitrogen limitation of algal biofilms in coastal wetlands of Lakes Michigan and Huron. *Freshw. Sci.* Nov 2015. DOI: 10.1086/684 646.
- De Jong, R., C.F. Drury, J.Y. Yang et C.F. Campbell, 2009. Risk of water contamination by nitrogen in Canada as estimated by the IROWC-N model. *J. Environ. Manage.* 90: 3169-3181.
- De Jong, R., J.Y. Yang, C.F. Drury, E.C. Huffman, V. Kirkwood, et X.M. Yang, 2007. The indicator of risk of water contamination by nitrate-nitrogen. *Can. J. Soil Sci.* 87:179-188.
- Drury, C.F., Agomoh, I., Yang, X.M., Philipps, L.A., Reynolds, W.D. Helmers, M., Calder, W. et Hedge, T. (2024). Stacking nitrogen management practices: Combining double-slot fertilizer injection with urease and nitrification inhibitors improves yields and reduces ammonia and nitrous oxide emissions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1-15. doi.10.1002/saj2.20677.
- Drury, C.F., C.S. Tan, J.D. Gaynor, T.O. Oloya et T.W. Welacky. 1996. Influence of controlled drainage subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss. *J. Environ. Qual.* 25 : 317-324.
- Drury, C.F., C.S. Tan, T.W. Welacky, W.D. Reynolds, T.Q. Zhang, T.O. Oloya, N.B. McLaughlin et J.D. Gaynor, 2014. Reducing nitrate loss in tile drainage water with cover crops and water table management systems. *J. Environ. Qua.* 43: 587-598.
- Drury, C.F., J.Y. Yang, R. De Jong, T. Huffman, X.M. Yang, et K. Reid, 2010. Residual Soil Nitrogen. Eilers, W., R. MacKay, L. Graham, et A. Lefebvre (éditeurs). *Environmental sustainability of Canadian agriculture: Agri-Environmental indicator report series, Report # 3.* Ottawa, Ontario, Canada: Agriculture et Agroalimentaire Canada; p. 74-80.
- Drury, C.F., J.Y. Yang, R. De Jong, X.M. Yang, E. Huffman, V. Kirkwood, et K. Reid, 2007. Residual soil nitrogen indicator for Canada. *Can. J. Soil Sci.* 87: 166-177.
- Drury, C.F., Yang, J.Y., et De Jong, R. 2016. Water Contamination by Nitrogen, in Clearwater, R.L., Martin, T. and Hoppe, T. (éditeurs) *Environmental*

sustainability of Canadian agriculture: Agri-environmental indicator report series, Report #4, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Chapitre 11, p. 121-130.

- Drury, C.F., Yang, X.M., Reynolds, W.D., Calder, W., Oloya, T.O., et Woodley, A.L. 2017. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia volatilization, nitrous oxide emissions and increases corn yields. *J. Environ. Qual.* 46: 939-949.
- Guy, M. 2008. Ideal performance standards for the nitrate ion. National Agri-Environmental Standards Initiative. Report No. 4-3. Environment Canada, Gatineau, Québec, Canada.
- Sevda, S., Sreekishnan, T.R., Pous, N., Puig, S. et Pant, D. 2018. Bioelectroremediation of perchlorate and nitrate contaminated water: A review. *Bioresour. Technol.* 255: 331-339.
- Sheppard, S. C., Bittman, S., Swift, M. L. et Tait, J. 2010. Farm practices survey and modelling to estimate monthly NH<sub>3</sub> emissions from swine production in 12 Ecoregions of Canada. *Can. J. Anim. Sci.* 90: 145-158.
- Sheppard, S. C., Bittman, S., Swift, M. L. et Tait, J. 2011. Modelling monthly NH<sub>3</sub> emissions from dairy in 12 Ecoregions of Canada. *Can. J. Anim. Sci.* 91: 649-661.
- Shi, X., Yang, X.M., Drury, C.F., Reynolds, W.D., McLaughlin, N.B., Welacky, T.W., et Zhang, X.D. 2011. Zone tillage impacts on organic carbon of a clay loam in southwestern Ontario. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:1083-1089.
- Walton, C. R., Zak, D., Audet, J., Petersen, R. J., Lange, J., Oehmke, C., et Hoffmann, C. C. 2020. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: Impacts of soil type, hydrology and vegetation. *Science of the Total Environment*, 727, 138 709.
- Wang, Z., Yang, J.Y., Drury, C.F., Jiang, R. 2021. Simulating alfalfa and pasture yields at regional and national scales in Canada from 1981 to 2019. *Agri. Syst.* 19: 103166. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103166>
- Ward, M.H., Jones, R.R., Brender, J.D., de Kok, T.M., Weyer, P.J., Nolan, B.T., Villanueva, C.M. et van Breda, S.G. 2018. Drinking water nitrate and human health: An updated review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15: 1557, 1-31.
- Watson, S. B., Miller, C., Arhonditsis, G., Boyer, G. L., Carmichael, W., Charlton, M. N., et Wilhelm, S. W. 2016. The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia. *Harmful algae*, 56, p. 44-66.

- Woodley, A.L., Drury, C.F., Reynolds, W.D., Tan, C.S., Yang, X.M. et Oloya, T.O. 2018. Long-term cropping effects on partitioning of water flow and nitrate loss between surface runoff and tile drainage. *J. Environ. Qual.* 47-820-829- doi.10.2134-jeq2017.07.0292.
- Woodley, A.L., Drury, C.F., Yang, X.M., Phillips, L.A., Reynolds, W.D., Calder, W. et T.O. Oloya. 2020. Ammonia volatilization, N<sub>2</sub>O emissions and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. *Soil Sci. Soc. Am.* 84: 1327-1341.
- Yang J.Y., Drury, C.F., De Jong, R., Huffman, Ted. et Yang, X.M. 2014. CANB v4.0: A Model for Simulating Residual Soil Nitrogen and Nitrogen Leaching in Canadian Regional Scale. DOI: 10.5220/0005005005290536
- Yang, J.Y., C.F. Drury, R. De Jong, E.C. Huffman, X.M. Yang, et K. Reid, 2013. Sensitivity analysis for nitrogen inputs, nitrogen outputs, and changes in biofuel crop acreages for predicting residual soil nitrogen and nitrate leaching in Canadian agricultural soils. *Ecol. Model.* 267: 26-38.
- Yang, J.Y., R. De Jong, C.F. Drury, E.C. Huffman, V. Kirkwood, et X.M. Yang, 2007. Development of a Canadian Agricultural Nitrogen Budget (CANB v2.0) model and the evaluation of various policy scenarios. *Can. J. Soil Sci.* 87: 153-165.
- Yang, J.Y., Drury, C.F., Jiang, R., Yang, X.M., Worth, D.E., Bittman, S., Grant, B.B., Smith, W.N., Reid, K. 2023. Simulating nitrogen balance in Canadian agricultural soils from 1981 to 2016. *J. Environ. Manag.* 341, 118015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118015>.
- Yang, J.Y., Drury, C.F., Jiang, R., Worth, D.E., Bittman, S., Grant, B.B. et Smith, W.N., 2024. Reactive nitrogen losses from Canadian agricultural soils over 36 years. *Ecol. Model.* 495, 110 809. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110809>