



Azote résiduel dans le sol

Rapport sur les indicateurs agroenvironnementaux

La durabilité environnementale de l'agriculture canadienne

Année de recensement 2021



Azote résiduel dans le sol

Rapport sur les indicateurs agroenvironnementaux, Année de recensement 2021

Statut : Couverture nationale, 1981-2021

Auteurs: C. F. Drury J. Y. Yang, et J. G. Liu

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, 2026

Version électronique disponible à publications.gc.ca

AAFC no. 13349F

No. de catalogue A59-128/2026F-PDF

ISBN 978-0-660-98504-6

Also published in English under the title, Residual Soil 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 ou composez sans frais le 1-855-773-0241.

Table des matières

L'enjeu et son importance.....	1
Indicateur ARS.....	2
Limites.....	5
Résultats et interprétation.....	5
Options d'intervention	18
Références	20

Liste des figures

Figure 1 : Estimation des apports et des pertes d'azote ainsi que de l'ARS dans les sols du Canada, de 1981 à 2021	7
Figure 2 : Concentration d'azote résiduel dans le sol (ARS) sur les terres agricoles du Canada en 1981 et 2021.	13
Figure 3 : Variation des concentrations d'ARS dans les terres agricoles du Canada, 1981 et 2021.	14

Liste des tableaux

Tableau 1 : Apports d'azote, pertes d'azote et azote résiduel dans le sol (kg N ha ⁻¹), de 1981 à 2021, par année de recensement (tous les cinq ans).....	6
Tableau 2 : Pourcentage (%) de terres agricoles dans les différentes catégories de risque lié à la concentration d'azote résiduel dans le sol (ARS), de 1981 à 2021.....	16

L'enjeu et son importance

Nous sommes de plus en plus conscients des effets environnementaux associés aux pertes d'azote (N) inorganique, notamment à la volatilisation de l'ammoniac, aux émissions d'oxyde nitreux et de diazote, et au lessivage de nitrates dans les sols agricoles, ainsi qu'à la nécessité de les atténuer tout en assurant la sécurité alimentaire. L'azote est un élément nutritif nécessaire à la production des cultures (les cultures peuvent utiliser l'ammonium [NH₄⁺] ou le nitrate [NO₃⁻]). L'utilisation et les transformations de l'azote dans les sols pour produire de grandes cultures sont cependant par nature très inconstantes, car des facteurs externes, notamment les conditions météorologiques, peuvent entraîner le lessivage de l'azote (nitrates) à travers le profil du sol et hors de la zone racinaire des cultures en cas de pluies excessives ou de fonte des neiges (Woodley *et al.*, 2018). L'azote peut également s'évaporer dans l'air par volatilisation de l'ammoniac à la suite d'une application d'azote si l'azote des engrais à base d'urée ou dans le fumier n'est pas intégré au sol (par exemple, par injection) ou si les engrais ne sont pas utilisés en combinaison avec un produit d'efficacité accrue qui peut réduire les pertes d'ammoniac par volatilisation (Drury *et al.*, 2017; Woodley *et al.*, 2020, Drury *et al.*, 2024). Le nitrate, une forme d'azote inorganique à la disposition des plantes, peut également être perdu sous formes gazeuses (oxyde nitreux et diazote) si le sol devient très humide à la suite de fortes pluies et que la concentration d'oxygène du sol diminue. Dans ces conditions, un processus microbien appelé dénitrification peut transformer le nitrate disponible dans les plantes en oxyde nitreux (N₂O), l'un des gaz à effet de serre (GES), et en diazote (N₂), qui peuvent s'échapper dans l'air, occasionner une perte économique et avoir des effets négatifs sur notre environnement. L'oxyde nitreux peut appauvrir la couche d'ozone dans la haute stratosphère et contribuer à la variabilité et aux changements climatiques. Le diagramme du cycle de l'azote relatif à la production de grandes cultures a été illustré dans le rapport n° 3 sur les indicateurs agroenvironnementaux (Drury *et al.*, 2016). Les changements et la variabilité climatiques peuvent aussi contribuer aux pertes si des pluies excessives ou des conditions de sécheresse entravent l'absorption de l'azote par les cultures. Le Canada faisait partie des 195 pays ayant signé en 2015 un accord pour lutter contre les changements climatiques et mettre en œuvre des stratégies qui contribueront à réduire l'augmentation des températures à moins de 2 °C (Environnement et Changement climatique Canada, 2016). L'indicateur d'azote résiduel dans le sol (ARS) peut aider à déterminer les régions où la gestion des nutriments devrait être mise en œuvre pour améliorer le bilan azoté dans les sols canadiens.

L'indicateur ARS a été mis au point pour mieux évaluer le risque de perte d'azote dans les sols agricoles en estimant la quantité d'azote restant dans le sol à la fin de la période de croissance (Drury *et al.*, 2007). Nous avons utilisé l'approche du bilan massique (apports d'azote = pertes d'azote + ARS) et des données sur le recensement (bases de données annuelles sur les cultures et le bétail), le rendement des cultures et les propriétés du sol, ainsi qu'un modèle CANBNr (bilan de l'azote réactif pour l'agriculture canadienne) pour tenir compte de tous les apports d'azote (engrais, fumier, les cultures de légumineuses et les dépôts atmosphériques) ainsi que les pertes d'azote (absorption d'azote par les cultures, volatilisation de l'ammoniac et émissions d'oxyde nitreux durant la période de croissance) afin de déterminer la quantité d'azote qui reste à la fin de la saison de culture et qui pourrait être perdue avant la plantation de la culture suivante. Nous avons estimé les apports et les pertes annuelles d'azote à l'échelle régionale, provinciale et nationale de 1981 à 2021. Ces renseignements nous aideront à déterminer quelles régions présentent un potentiel élevé de présence d'azote inorganique résiduel dans le sol après la récolte des cultures et quelles régions présentent un potentiel faible, de sorte que l'on puisse cibler des pratiques de gestion bénéfiques (PGB) appropriées, surtout dans les zones dont le potentiel est élevé ou très élevé. Comme l'indicateur ARS a également des composantes temporelles et spatiales, nous pouvons examiner les variations de cet indicateur et potentiellement déterminer ses tendances au fil du temps (sur 40 ans) à l'échelle régionale, provinciale ou nationale. Par exemple, l'ARS peut servir à déterminer si des changements dans les pratiques de gestion des sols et des cultures pour des conditions d'utilisation d'azote données ont conduit à des améliorations avec un risque moindre au fil du temps ou, à l'inverse, si des changements dans les systèmes de culture ou le climat ont mené à une augmentation du risque et à des pertes potentielles au fil du temps.

Indicateur ARS

L'indicateur ARS fournit une estimation de l'azote inorganique « en trop » dans le sol à la fin de la saison de culture et peut donc être considéré comme un indicateur d'efficacité de l'utilisation de l'azote. Dans les conditions idéales, l'application d'azote devrait correspondre à l'absorption d'azote par la culture et les pertes devraient alors être négligeables durant la période de croissance, c'est-à-dire qu'il devrait rester très peu d'azote dans le sol après la récolte. Cependant, cela se produit rarement pour de multiples raisons, notamment la variabilité du climat (p. ex. la fréquence et l'intensité des précipitations durant la période de croissance) et les facteurs du sol pouvant limiter l'absorption d'azote par les cultures. Si l'azote est appliqué sous forme d'engrais, de fumier ou de la décomposition d'une légumineuse précédemment cultivée, et qu'une forte pluie survient avant que les plantes puissent absorber l'azote inorganique dans le

sol, l'azote peut être perdu par lessivage ou dénitrification. En outre, si la source d'azote ajoutée au sol est de l'urée ou une solution d'urée et de nitrate d'ammonium, alors, pendant l'hydrolyse de l'urée en ammonium dans le sol, une partie de l'azote peut être perdue en raison de la volatilisation de l'ammoniac dans l'air (Drury *et al.*, 2017; Woodley *et al.*, 2020). Cette transformation chimique se produit lorsque le pH environnant est supérieur à 7, et la perte d'azote de l'engrais à base d'urée peut être exacerbée par des conditions chaudes et venteuses. Il se peut également que certaines sources d'azote ne soient pas entièrement prises en compte lors de l'ajout du fumier ou de l'engrais azoté au sol ou qu'une application excessive soit effectuée pour combler les pertes mentionnées plus haut. Les apports d'azote peuvent être transférés de la saison de croissance précédente (en particulier si la période hivernale/printanière a été sèche avec un lessivage de nitrates minimal ou des pertes de N_2O similaires aux pertes enregistrées dans les régions plus sèches du Canada), et donc la contribution d'une culture de légumineuses estivale ou d'une culture de couverture hivernale peut représenter un apport additionnel d'azote qui doit être pris en compte au moment de déterminer les besoins en azote d'une culture. Par conséquent, la culture peut disposer de plus d'azote qu'elle n'en a besoin, ce qui peut entraîner un excès d'ARS à la fin de la saison de croissance. Même si nous tenons soigneusement compte de tous les apports d'azote, si des facteurs incontrôlables tels que les sécheresses, les inondations, les ravageurs, les agents pathogènes ou les mauvaises herbes influent sur la croissance des cultures et l'absorption de l'azote, la culture peut ne pas atteindre le potentiel de rendement souhaité, ce qui peut également entraîner un excédent d'azote inorganique dans le sol à la fin de la saison de croissance.

Il convient de noter que les méthodes utilisées pour estimer les apports et les pertes d'azote étaient légèrement différentes dans ce rapport comparativement au précédent rapport du Rapport sur les indicateurs agroenvironnementaux relatifs à l'ARS (Drury *et al.*, 2016). Dans le rapport précédent, nous avons tenu compte de tous les apports et de toutes les pertes d'azote dans le sol, comme la quantité d'engrais ou d'azote du fumier qui a été appliquée sur le sol. Ainsi, dans notre scénario, s'il y avait des pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac ou dénitrification durant le stockage du fumier, elles n'étaient pas considérées comme un apport au sol et leurs pertes n'étaient pas non plus considérées comme une perte directe d'azote. La nouvelle version du modèle comprend des étapes supplémentaires dans le processus. L'azote du fumier de tous les animaux d'élevage est maintenant pris en compte dans les apports, et les pertes occasionnées durant le stockage du fumier sont maintenant considérées dans la catégorie des pertes d'azote (Yang *et al.*, 2023, 2024). Par conséquent, en général, les apports et pertes d'azote de ce rapport sont quantitativement plus importants que ceux qui ont été rapportés précédemment. Par ailleurs, les données sur la luzerne et sur le rendement des pâturages améliorés et non améliorés sont plus nombreuses que lors des rapports précédents. Ces données, combinées à l'utilisation du modèle EPIC

(Environmental Policy Integrated Climate model), nous ont permis d'obtenir des estimations améliorées des rendements et des apports en azote de la luzerne, des pâturages améliorés et des pâturages non améliorés par rapport à ce que l'on obtenait auparavant (Wang *et al.*, 2021).

Le modèle CANBNr a été mis à jour à partir des versions précédentes du modèle CANB version 4.0 (Yang *et al.*, 2014; Drury *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2023, 2024). Le modèle CANBNr calcule la quantité d'ARS à l'aide de différentes données, entre autres les données du Recensement de l'agriculture (RDA) et du Service d'information sur les sols au Canada (SISCan), les données sur les apports additionnels d'azote (ventes d'engrais) et les pertes d'azote (absorption d'azote par les cultures, émissions d'ammoniac et d'oxyde nitreux), et les coefficients d'azote (p. ex. teneur en azote de diverses cultures et de divers fumiers). La base de données sur le Recensement de l'agriculture comprend les types de cultures, les superficies et les rendements, ainsi que les types et le nombre de têtes de bétail. La version 3.2 du document Pédopaysages du Canada (PPC) de la base de données SISCan contient des renseignements sur les types de sols et les propriétés du paysage. L'indicateur ARS est calculé pour chacun des 3 487 polygones agricoles des PPC (Groupe de travail sur les pédopaysages du Canada, 2010). Le modèle CANBNr calcule l'ARS pour chaque polygone des PPC comme suit :

$$\text{Apport d'azote} = N_{\text{engrais}} + N_{\text{fumier}} + N_{\text{fixation}} + N_{\text{dépôt}} \quad [1]$$

$$N_{\text{perte}} = N_{\text{aliments}} + N_{\text{nourriture du bétail}} + N_{\text{N}_2\text{O}} + N_{\text{NH}_3} \quad [2]$$

$$\text{ARS} = N_{\text{apport}} - N_{\text{perte}} \quad [3]$$

Où N_{engrais} est la quantité totale d'engrais azoté appliquée aux cultures; N_{fumier} est la quantité totale de fumier azoté produit par le bétail; N_{fixation} est la quantité totale d'azote fixé par les cultures de légumineuses et $N_{\text{dépôt}}$ est la quantité de dépôts humides et secs d'azote atmosphérique. Pour l'équation de perte de l'azote, N_{aliments} et $N_{\text{nourriture du bétail}}$ sont les quantités d'azote retirées dans la partie récoltée des cultures et des pâturages; $N_{\text{N}_2\text{O}}$ est le nitrate perdu sous forme d'oxyde nitreux par le sol ou le fumier stocké; N_{NH_3} représente les pertes par volatilisation de l'ammoniac provenant des engrais et du fumier. Yang *et al.* (2023, 2024) ont fourni plus de détails sur le modèle. Les pertes de $N_{\text{N}_2\text{O}}$ et de N_{NH_3} ont été obtenues auprès des équipes travaillant respectivement sur l'indicateur de N_2O et de NH_3 ; elles sont décrites plus en détail dans le chapitre qui leur est consacré et dans les rapports techniques connexes.

Une valeur ARS est considérée comme très faible si elle se situe entre 0 et 9,9 kg N ha⁻¹, comme faible entre 10 et 19,9 kg N ha⁻¹, comme modérée entre 20 et 29,9 kg N ha⁻¹, comme élevée entre 30 et 39,9 kg N ha⁻¹ et comme très élevée si elle est ≥ 40,0 kg N ha⁻¹.

Limites

L'indicateur ARS fournit une estimation de la quantité d'azote inorganique dans le sol après la récolte dans différents sols, différentes régions et différents climats du Canada. Les valeurs d'ARS n'ont pas été mesurées directement, car cela n'est pas pratique à l'échelle régionale, provinciale ou nationale. Les données utilisées pour prévoir la quantité d'ARS sont plutôt fondées sur les données concernant l'application d'azote aux cultures et les ventes d'engrais azotés, le nombre de têtes de bétail et leur taux d'excrétion habituelle, la fixation biologique d'azote par les cultures de légumineuses et d'autres cultures, et les superficies récoltées avec leurs rendements propres. De plus, une base de données complète incluant les propriétés du sol et du paysage associées aux terres agricoles au Canada a été utilisée. Les données sur l'activité, y compris les pratiques de conservation et de gestion des nutriments qui peuvent réduire les pertes par lessivage de NH₃, de N₂O, de N₂ ou de NO₃, ne sont pas disponibles à l'échelle régionale, provinciale ni nationale et n'ont donc pas pu être prises en compte dans le présent rapport. Quoi qu'il en soit, l'ARS nous renseigne sur les régions qui pourraient présenter un risque élevé ou un risque faible, ainsi que sur l'évolution de l'ARS de ces régions dans le temps.

Résultats et interprétation

Les apports d'azote ont varié selon la province et la période, pour les années de recensement (aux cinq ans) de 1981 à 2021 (tableau 1). En 1981, la Saskatchewan avait les apports d'azote les plus faibles de toutes les provinces, soit 23,0 kg N ha⁻¹, ce qui était probablement attribuable aux besoins en azote des cultures, car de nombreuses régions étaient assez sèches, ainsi qu'au nombre d'acres qui n'auraient pas reçu d'azote parce qu'ils étaient en jachère (cette pratique était dans le passé un moyen de conservation de l'humidité du sol). Les deux autres provinces des Prairies, soit l'Alberta et le Manitoba, ont également enregistré des apports d'azote assez faibles, soit 52,5 et 61,5 kg N ha⁻¹, respectivement, comparativement à la Colombie-Britannique (107,0 kg N ha⁻¹) ainsi qu'aux provinces centrales et maritimes, dont les apports en azote variaient de 98,8 à 177,6 kg N ha⁻¹ en 1981.

Tableau 1 : Apports d'azote, pertes d'azote et azote résiduel dans le sol (kg N ha⁻¹), de 1981 à 2021, par année de recensement (tous les cinq ans).

Catégorie	N entrée									N sortie									ARS								
	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	107,0	103,9	104,8	116,8	123,0	121,8	119,7	133,0	149,0	61,4	57,2	58,3	61,7	54,2	63,4	62,5	76,0	58,6	45,7	46,8	46,4	55,0	68,8	58,4	57,2	57,0	90,4
Alberta	52,5	49,6	55,0	65,3	72,6	74,7	82,1	87,8	86,8	43,4	45,5	46,5	48,5	46,9	57,3	61,1	73,2	50,9	9,1	4,1	8,6	16,8	25,7	17,4	21,0	14,6	35,9
Saskatchewan	23,0	27,1	26,2	43,8	51,0	58,4	67,1	81,2	85,9	28,4	34,0	34,5	40,1	34,5	45,3	51,3	64,3	42,7	-5,4	-7,0	-8,4	3,7	16,5	13,1	15,8	16,9	43,1
Manitoba	61,5	79,9	87,4	98,8	107,6	108,1	114,3	138,4	138,0	50,8	59,1	60,4	65,7	62,9	73,9	70,0	98,2	79,7	10,7	20,8	27,1	33,1	44,6	34,2	44,3	40,2	58,3
Ontario	147,5	155,0	152,8	161,3	165,7	169,9	170,3	160,0	183,4	104,8	107,0	110,9	117,0	104,9	137,5	136,1	139,4	150,4	42,8	48,0	42,0	44,3	60,8	32,4	34,3	20,6	33,1
Québec	139,3	154,5	154,1	166,9	175,0	172,6	180,5	200,4	211,3	98,5	103,5	99,2	116,7	108,2	116,8	120,9	140,5	136,6	40,7	51,0	55,0	50,2	66,8	55,7	59,7	59,9	74,7
Nouveau-Brunswick	98,8	107,2	111,3	117,9	134,3	134,7	118,2	144,3	168,0	72,3	74,3	71,5	82,1	83,2	83,3	81,1	82,8	85,7	26,5	32,9	39,8	35,8	51,1	51,4	37,2	61,4	82,3
Nouvelle-Écosse	109,8	118,5	119,0	137,7	132,3	133,6	121,6	132,1	152,6	76,6	79,5	74,6	99,7	74,9	80,1	79,4	77,9	85,1	33,2	39,0	44,5	38,0	57,4	53,5	42,2	54,1	67,5
Île-du-Prince-Édouard	102,8	112,7	121,4	140,1	146,5	156,2	130,0	174,3	206,2	75,6	81,1	77,0	94,3	78,6	90,5	95,8	99,5	105,9	27,2	31,6	44,4	45,8	67,9	65,7	34,3	74,8	100,3
Terre-Neuve et Labrador	177,5	204,0	206,8	219,2	186,6	222,2	209,0	224,1	359,1	95,5	109,3	110,2	137,2	101,2	116,1	113,7	134,0	156,8	82,1	94,7	96,6	82,0	85,4	106,2	95,3	90,1	202,3
Canada	56,3	59,1	60,4	73,9	81,1	85,4	92,2	102,6	107,2	47,3	50,7	51,1	56,2	51,4	63,8	67,3	80,6	63,0	9,1	8,4	9,3	17,7	29,7	21,6	25,0	22,0	44,2

Au Canada, au fil du temps, l'augmentation globale de l'apport d'azote a été quasi linéaire (figure 1), bien qu'elle ait varié selon la province, les apports d'azote maximums ayant été observés en 2021, où ils s'échelonnaient entre 85,9 kg N ha⁻¹ en Saskatchewan et 359,1 kg N ha⁻¹ à Terre-Neuve-et-Labrador (tableau 1). En 2021, les apports d'azote au Manitoba, à l'Île-du-Prince-Édouard et à Terre-Neuve-et-Labrador en 2021 ont doublé par rapport à ceux de 1981, tandis que les apports d'azote en Saskatchewan ont plus que triplé au cours de la période de 40 ans (passant de 23,0 kg N ha⁻¹ en 1981 à 85,9 kg N ha⁻¹ en 2021). Pour toutes les terres cultivées au Canada, les apports moyens ont presque doublé, passant de 56,3 kg N ha⁻¹ en 1981 à 107,2 kg N ha⁻¹ en 2021. L'augmentation des apports d'azote au fil du temps est attribuable à plusieurs facteurs, notamment 1) à une fertilisation par l'azote accrue, en partie due au recours à de nouvelles variétés à rendement plus élevé ayant des besoins accrus en azote; 2) à des changements dans les types d'engrais azotés épandus (actuellement, la majorité des engrais azotés épandus au Canada sont soit à base d'urée granulée ou de nitrate d'ammonium et d'urée liquide); 3) à une réduction de superficie des terres en jachère dans l'Ouest canadien; 4) à une augmentation de la superficies et des apports d'azote des cultures de légumineuses; et 5) à des changements dans le choix des cultures.

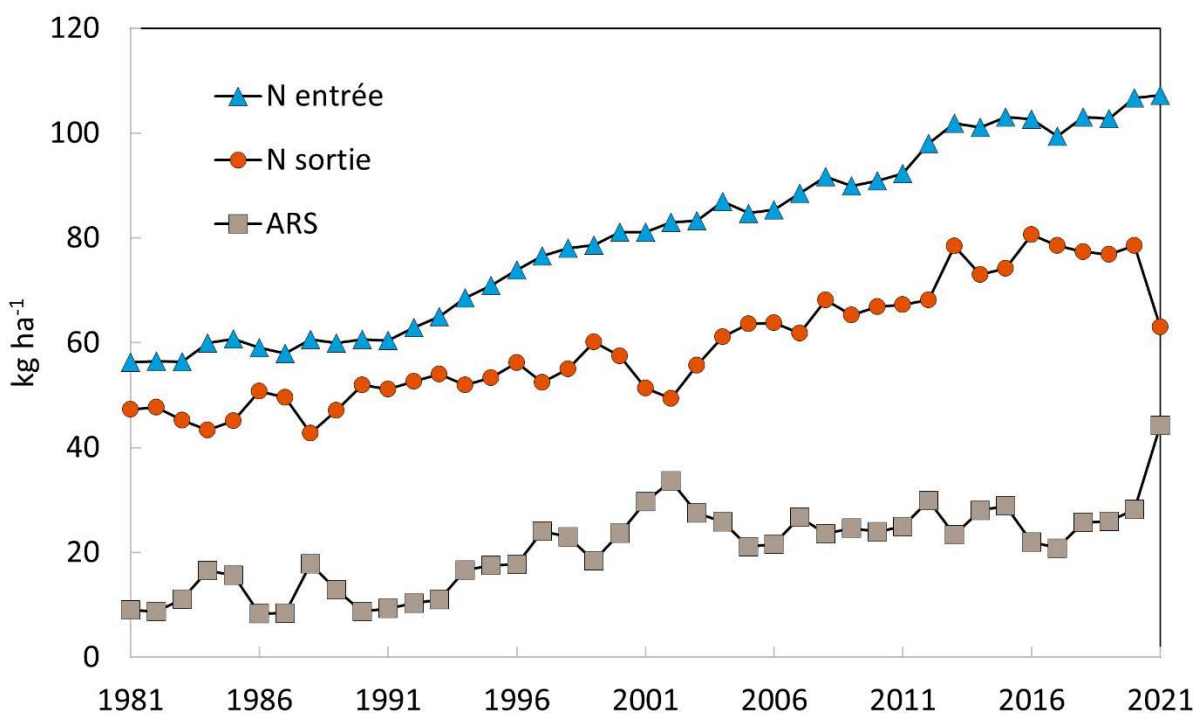


Figure 1 : Estimation des apports et des pertes d'azote ainsi que de l'ARS dans les sols du Canada, de 1981 à 2021

En 1981, les pertes d'azote ont également varié d'une province à l'autre et au fil du temps, les pertes les plus faibles ont été enregistrées dans les provinces des Prairies (28,4 à 50,8 kg N ha⁻¹), les pertes intermédiaires en Colombie-Britannique (61,4 kg N ha⁻¹) et dans les provinces de l'Atlantique (72,3 à 95,5 kg N ha⁻¹), tandis que les pertes d'azote estimées les plus élevées étaient en Ontario (104,8 kg N ha⁻¹) et au Québec (98,5 kg N ha⁻¹) (tableau 1). À l'instar des apports d'azote, les pertes d'azote ont également augmenté au fil du temps au Canada, mais l'écart entre ces deux valeurs a lui aussi généralement augmenté au fil du temps (figure 1). En 2021, la Saskatchewan et l'Alberta ont enregistré les plus faibles pertes d'azote, soit des pertes respectives de 42,7 et de 50,9 kg N ha⁻¹, tandis que l'Ontario, le Québec et Terre-Neuve-et-Labrador ont enregistré les pertes d'azote les plus importantes, soit des pertes de 136,6 à 156 kg N ha⁻¹. Dans les provinces des Prairies, au Québec et en Colombie-Britannique, les plus grandes pertes d'azote ont eu lieu au cours de l'année de recensement 2016; dans les autres provinces, elles ont eu lieu en 2021, sauf en Nouvelle-Écosse, où elles ont plutôt eu lieu en 1996 (tableau 1). Les pertes totales d'azote pour le Canada ont augmenté au fil du temps, les pertes les plus importantes (80,6 kg N ha⁻¹) ayant été enregistrées en 2016, soit une augmentation de 72 % par rapport aux pertes de 47,3 kg N ha⁻¹ enregistrées en 1981, bien que ces pertes aient diminué pour atteindre 63,0 kg N ha⁻¹ en 2021 en raison des baisses de rendement causées par la sécheresse dans de nombreuses régions canadiennes. La hausse des pertes d'azote est principalement due à l'augmentation du rendement des cultures et à l'absorption de l'azote par suite de l'amélioration des pratiques agricoles (par exemple, variétés de cultures à rendement plus élevé, changements dans les types de cultures et leur répartition, réduction des superficies de jachère dans les Prairies).

L'ARS est la différence entre les apports et les pertes d'azote. Étant donné que les apports d'azote ont augmenté plus rapidement que les pertes, la valeur ARS a elle aussi augmenté au fil du temps (figure 1, tableau 1). En 1981, les valeurs d'ARS allaient de 9,1 à 45,7 kg N ha⁻¹ dans la plupart des provinces, sauf en Saskatchewan et à Terre-Neuve-et-Labrador. En Saskatchewan, l'ARS a présenté des valeurs négatives entre 1981 et 1991, a augmenté pour passer de 3,7 kg N ha⁻¹ en 1996 à 16,9 kg N ha⁻¹ en 2016, puis a plus que doublé pour passer à 43,1 kg N ha⁻¹ entre 2016 et 2021. En revanche, la valeur ARS à Terre-Neuve-et-Labrador a été relativement constante de 1981 (82,1 kg N ha⁻¹) à 2016 (90,2 kg N ha⁻¹), puis elle a doublé pour atteindre 202,3 kg N ha⁻¹ en 2021. En 2021, les valeurs d'ARS allaient de 33,1 kg N ha⁻¹ à 202,3 kg N ha⁻¹, et en 2021, elles étaient les plus élevées depuis 40 ans, sauf en Ontario, où elles ont été les plus élevées (60,8 kg N ha⁻¹) en 2001, une autre année de sécheresse.

La valeur moyenne d'ARS au Canada est passée de 9,1 kg ha⁻¹ en 1981 à 22,0 kg N ha⁻¹ en 2016, puis elle a doublé pour atteindre 44,2 kg N ha⁻¹ en 2021. La valeur ARS multipliée par deux entre 2016 et 2021 l'a principalement été à la suite des conditions de sécheresse en 2021 qui ont entraîné une réduction des rendements. Par exemple,

en 2021 en Alberta, les précipitations pour la période de juin à août (145 mm) étaient inférieures de 31 % à la moyenne sur 41 ans (208 mm), tandis que celles de 2016 (237 mm) étaient supérieures de 14 % à la moyenne (tableau S1). De même, les précipitations de juin à août étaient inférieures à la moyenne de 29 % en Colombie-Britannique et inférieures à la moyenne de 24 % au Québec; elles ont été inférieures à la moyenne sur 41 ans de 14 % en Ontario, tandis que toutes les provinces des Prairies et la Colombie-Britannique ont reçu plus de précipitations que la moyenne en 2016. L'incidence des conditions de sécheresse au cours des années de recensement 2001 et 2021 a réduit les rendements moyens et les apports d'azote (figure S1). Par exemple, en 2016, l'apport moyen d'azote au Canada était de 73,8 kg N ha⁻¹, tandis qu'il était de 55,8 kg N ha⁻¹ en 2021 (figure S1). La différence dans l'absorption d'azote entre 2016 et 2021 (18 kg N ha⁻¹) explique 81 % de l'augmentation de l'ARS au cours de ces deux années de recensement. Des pics d'ARS résultant des conditions de sécheresse et de la réduction de l'absorption d'azote par les cultures ont également été observés au cours du recensement de 2001 (tableau 1, S1, figure S1).

Tableau S1 : Précipitations moyennes de juin à août pour l'année de recensement et variation par rapport à la moyenne sur 41 ans en 2001, en 2016 et en 2021 et par province au Canada

Province	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	Moyenne de 41 ans	2001	2016	2021
	Précipitation Moyenne de juin à août (mm)										% de changement à la Moyenne de 41 ans		
Colombie-Britannique	169	148	203	171	199	122	201	215	126	176	13	22	-29
Alberta	177	215	224	201	174	173	238	237	145	208	-16	14	-31
Saskatchewan	180	163	215	147	136	158	233	228	159	191	-29	19	-17
Manitoba	238	197	225	181	203	130	211	273	217	224	-10	22	-3
Ontario	255	258	179	209	192	212	210	183	190	222	-13	-18	-15
Québec	327	369	248	294	285	325	353	297	226	299	-5	-1	-25
Nouveau-Brunswick	365	322	288	257	212	347	409	298	238	283	-25	5	-16
Nouvelle-Écosse	283	264	191	210	181	372	281	218	225	240	-24	-9	-6
Île-du-Prince-Édouard	342	268	202	203	163	363	317	264	261	254	-36	4	3
Terre-Neuve et Labrador	389	271	276	304	255	379	304	298	260	302	-16	-2	-14

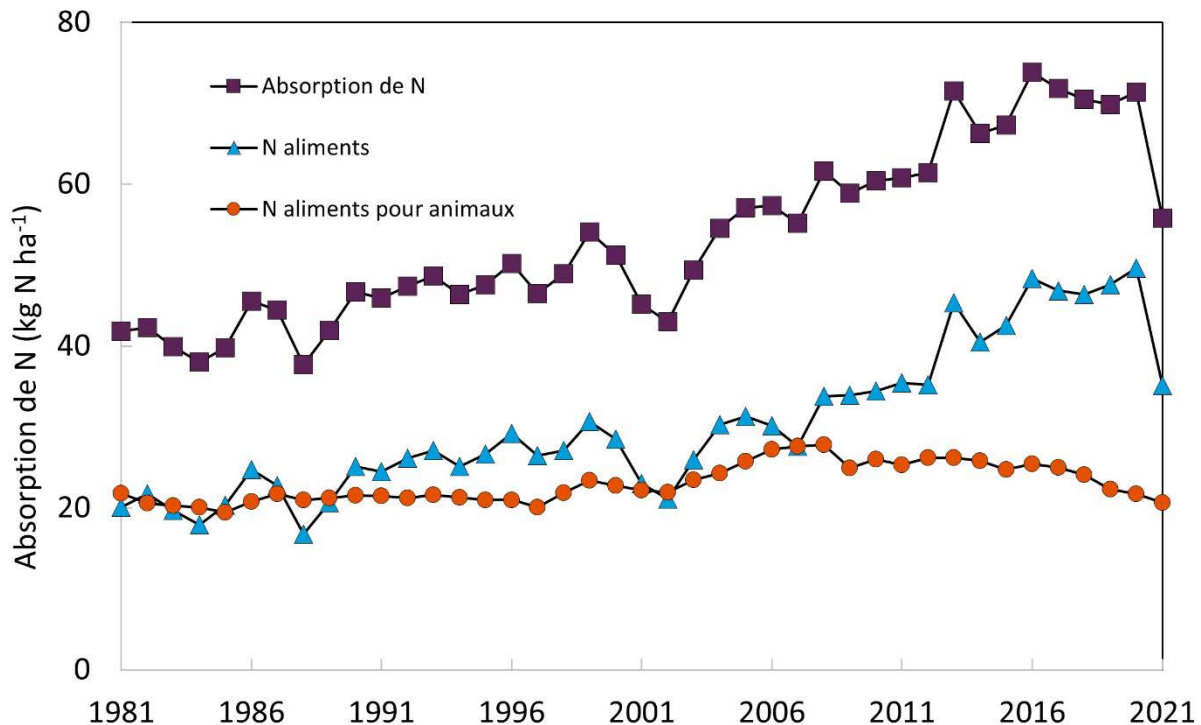
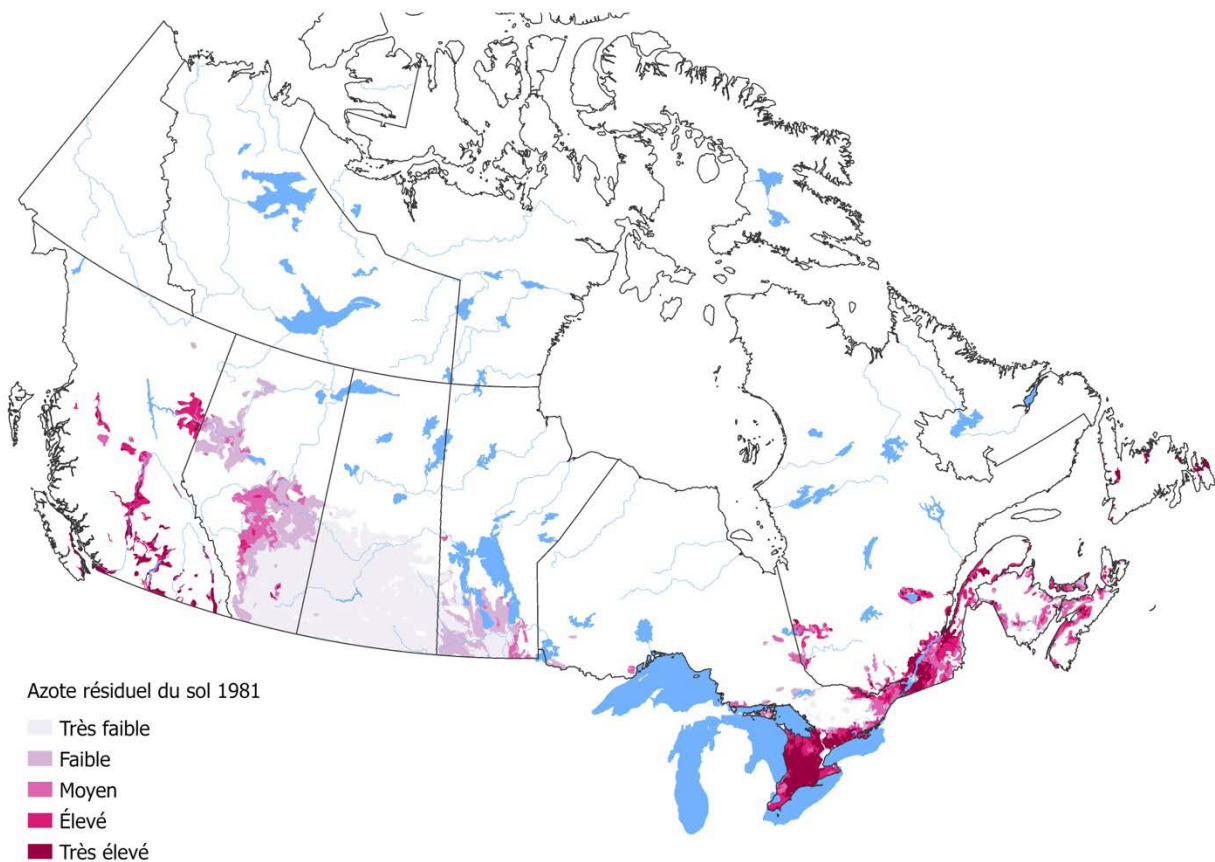


Figure S1 : Absorption moyenne estimée de l'azote par les cultures dans les sols canadiens, de 1981 à 2021

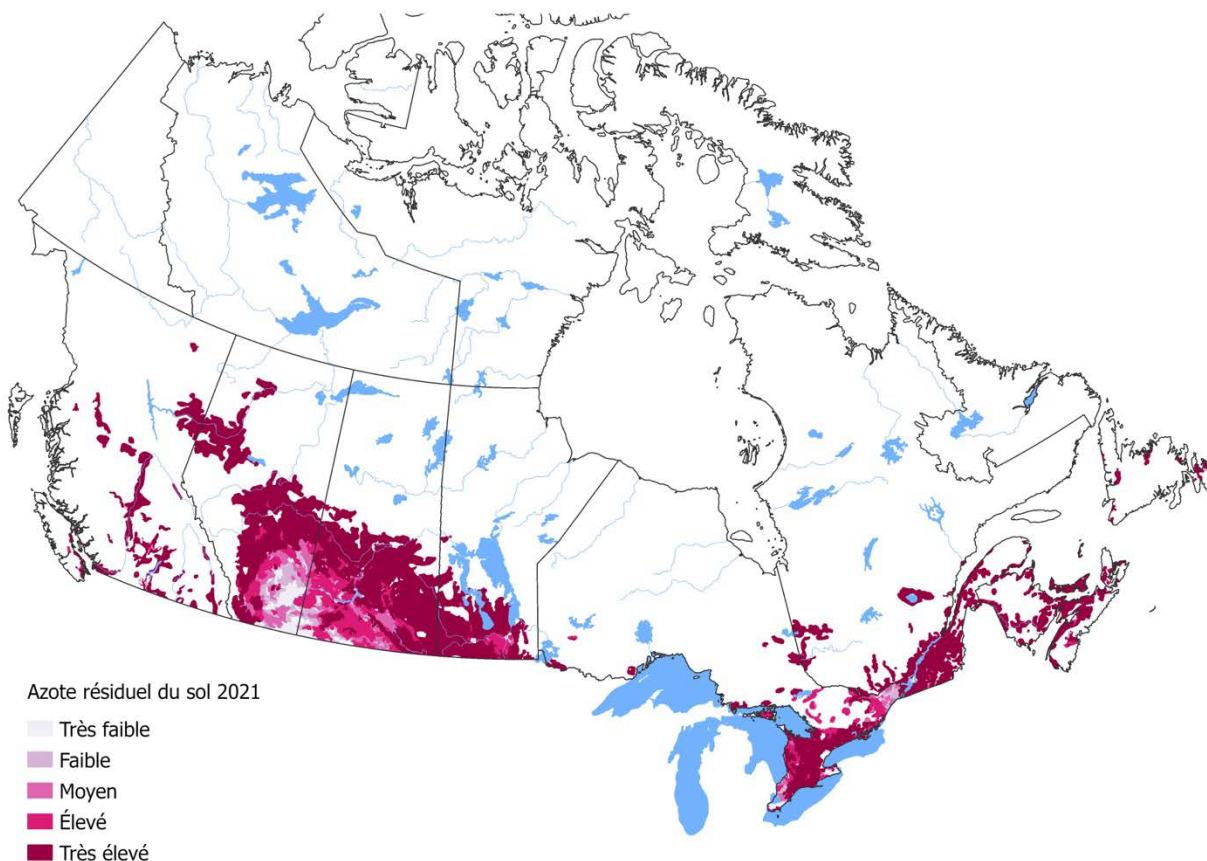
Dans l'ensemble, la valeur ARS a presque quintuplé ($35,1 \text{ kg N ha}^{-1}$) sur une période de 40 ans. Il convient toutefois de noter qu'en 2021, la valeur ARS était considérablement plus élevée que celle de 2016, et que la valeur ARS en 2001 était plus élevée que celle de 1996, l'année de recensement précédente. Ces pics d'ARS pourraient être principalement attribués à la réduction du rendement des cultures et à l'apport d'azote résultant des conditions de sécheresse au cours des étés 2001 et 2021.

Les cartes de l'ARS pour 1981 et 2021 montrent les différentes catégories de risque associées aux 3 847 polygones agricoles au Canada (figure 2). En 1981, la majorité des régions agricoles de la Saskatchewan, du sud de l'Alberta et du nord de l'Ontario affichaient des concentrations d'ARS très faibles à faibles (figure 2). En 1981, dans le nord de l'Alberta et le sud du Manitoba, les concentrations d'ARS étaient dans la catégorie de risque très modéré, tandis que dans le centre de la Colombie-Britannique, le sud de l'Ontario et de nombreuses régions du Québec et des provinces de l'Atlantique, les concentrations étaient dans la catégorie de risque élevé à très élevé. Dans l'ensemble, par rapport à 1981, beaucoup plus de régions au Canada

présentaient en 2021 des concentrations d'ARS dans la catégorie de risque modéré à très élevé. Par exemple, en plus des concentrations d'ARS dans la catégorie de risque très élevé en Colombie-Britannique et dans la plupart des provinces de l'Atlantique, la plupart des régions agricoles du Manitoba ainsi que le nord de l'Alberta et de la Saskatchewan présentaient alors également des concentrations d'ARS dans la catégorie de risque très élevé. En revanche, dans le sud-ouest de l'Ontario, les catégories de risque associées aux concentrations d'ARS se sont quelque peu améliorées en 2021 par rapport à celles de 1981, en partie grâce aux rendements plus élevés attribuables à des conditions météorologiques favorables dans la région.



1981



2021

Figure 2 : Concentration d’azote résiduel dans le sol (ARS) sur les terres agricoles du Canada en 1981 et 2021.

Les différences dans les catégories de risque au cours des 40 années (c’est-à-dire, de 1981 à 2021) ont indiqué que la plupart des terres agricoles canadiennes étaient associées à des catégories d’au moins deux niveaux de risque plus élevées en 2021 qu’en 1981 (figure 3). Certaines zones de la Colombie-Britannique, du sud de l’Alberta, du sud de la Saskatchewan, du sud de l’Ontario et de certaines basses terres du Saint-Laurent ont conservé les mêmes catégories de risque. Dans le cas de la Colombie-Britannique et des basses terres du Saint-Laurent, la raison pour laquelle il n’y a pas eu

de changement apparent des niveaux de risque est que ces niveaux étaient déjà les plus élevés en 1981.

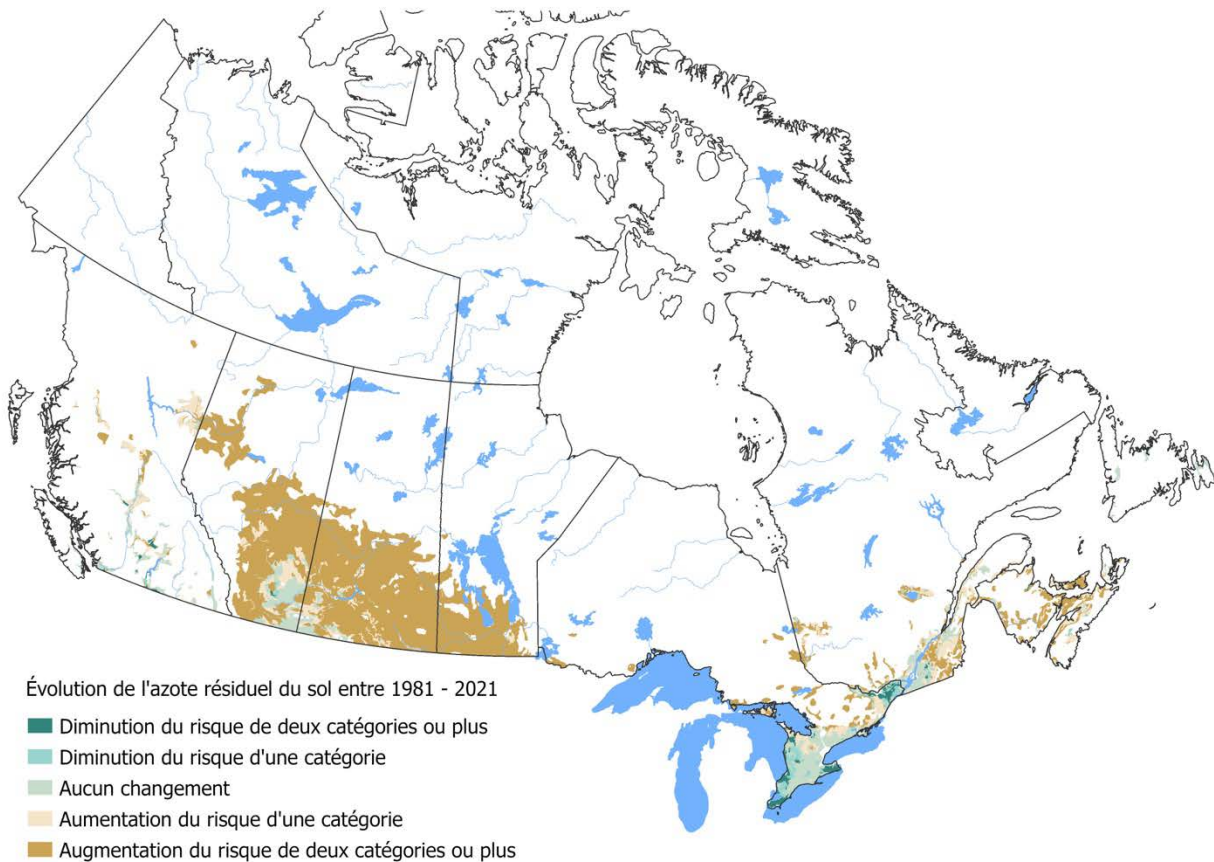


Figure 3 : Variation des concentrations d'ARS dans les terres agricoles du Canada, 1981 et 2021.

En 1981, toute la Saskatchewan et entre 45 % et 48 % du Manitoba et de l'Alberta se trouvaient dans la catégorie de risque très faible en ce qui concerne l'ARS. En revanche, toutes les autres provinces avaient entre 0 et 2 % de leurs terres dans cette catégorie de risque très faible qui contenait moins de $9,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ d'ARS. En 1981, 52 % des terres du Manitoba étaient classées dans la catégorie de risque faible (10 à $19,9 \text{ kg N ha}^{-1}$), l'Alberta arrivait ensuite avec 38 % de ses terres dans la même catégorie (tableau 2). Pour toutes les autres provinces, entre 0 % et 22 % des terres se classaient dans la catégorie de risque le plus faible. Au Nouveau-Brunswick, en

Nouvelle-Écosse et à l'Île-du-Prince-Édouard, entre 45 % et 49 % des terres étaient alors dans la catégorie de risque modéré (20 à 29,9 kg N ha⁻¹). La fourchette pour les autres provinces se situait entre 0 % pour la Saskatchewan et 23 % pour le Québec. En 1981, l'Ontario et le Québec comptaient entre 27 % et 33 % de leurs terres agricoles dans la catégorie de risque élevé, tandis que le Nouveau-Brunswick, la Nouvelle-Écosse et l'Île-du-Prince-Édouard comptaient entre 25 % et 43 % de leurs terres dans cette catégorie, et que la Colombie-Britannique avait la superficie la plus élevée (48 %) dans cette catégorie. En 1981, de très petites régions des provinces des Prairies (0 à 1 %) et de Terre-Neuve-et-Labrador (7 %) étaient dans la catégorie de risque élevé. Terre-Neuve-et-Labrador comptait la plus grande proportion (92 %) de terres agricoles dont la concentration d'ARS était dans la catégorie de risque très élevé ($\geq 40,0$ kg N ha⁻¹), suivie de l'Ontario (51 %), du Québec (43 %) et de la Colombie-Britannique (38 %); toutes les autres provinces comptaient moins de 10 % de leurs terres agricoles dans cette catégorie de risque.

Tableau 2 : Pourcentage (%) de terres agricoles dans les différentes catégories de risque lié à la concentration d'azote résiduel dans le sol (ARS), de 1981 à 2021. La catégorie de risque très faible va de 0 à 9,9 kg N ha⁻¹, de risque faible, de 10,0 à 19,9 kg N ha⁻¹, de risque modéré, de 20,0 à 29,9 kg N ha⁻¹, de risque élevé, de 30,0 à 39,9 kg N ha⁻¹, tandis que les concentrations d'ARS dans la classe de risque très élevé sont ≥ 40,0 kg N ha⁻¹.

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	1	0	0	0	0	0	0	2	3	4	2	3	2	2	3	4	7	6	9	18	8	6	6	6	9	9	3
Alberta	48	71	50	41	23	40	36	42	14	38	24	34	11	20	12	10	17	12	13	5	14	29	10	24	14	20	12
Saskatchewan	100	100	100	79	29	37	43	44	4	0	0	0	18	35	42	19	14	10	0	0	0	2	33	19	23	12	12
Manitoba	45	15	10	13	0	3	2	14	0	52	13	6	5	2	14	5	4	1	4	69	40	2	12	9	13	3	6
Ontario	2	2	1	3	0	10	9	23	15	5	2	9	8	0	8	9	14	9	15	12	6	8	1	14	14	39	13
Québec	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	1	2	0	0	1	2	0	23	14	5	8	0	2	3	5	1
Nouveau-Brunswick	2	0	0	0	0	0	1	0	1	22	16	3	8	1	1	3	1	1	45	35	26	31	6	8	19	3	0
Nouvelle-Écosse	0	0	0	0	1	0	1	1	0	4	3	0	4	1	1	2	0	2	44	25	6	45	1	3	19	11	2
Île-du-Prince-Édouard	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	49	59	6	10	0	0	22	0	0
Terre-Neuve et Labrador	0	0	0	12	0	2	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0	1	4	1	1	0	3	0	0	2	3	0
Canada	61	66	59	48	19	29	31	36	8	18	9	12	13	21	24	12	13	9	8	11	9	12	19	18	17	16	11

Catégorie	Élevé									Très élevé								
	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	1981	1986	1991	1981	1986	1991	1996	2001	2006
Colombie-Britannique	48	30	46	16	6	9	9	8	3	38	50	43	48	30	46	16	6	9
Alberta	1	0	2	15	32	20	25	19	12	0	0	0	1	0	2	15	32	20
Saskatchewan	0	0	0	0	4	2	13	24	21	0	0	0	0	0	0	0	4	2
Manitoba	0	2	44	50	9	40	11	21	12	0	0	0	0	2	44	50	9	40
Ontario	27	23	29	19	3	40	33	19	30	51	62	55	27	23	29	19	3	40
Québec	33	30	20	24	3	9	8	16	5	43	55	75	33	30	20	24	3	9
Nouveau-Brunswick	25	27	33	31	11	25	42	12	2	6	21	38	25	27	33	31	11	25
Nouvelle-Écosse	43	42	49	28	5	16	39	10	10	9	31	46	43	42	49	28	5	16
Île-du-Prince-Édouard	38	19	43	34	0	0	49	0	0	0	22	51	38	19	43	34	0	0
Terre-Neuve et Labrador	7	0	4	12	0	8	6	3	3	92	99	96	7	0	4	12	0	8
Canada	6	5	10	13	13	15	19	21	17	8	9	9	6	5	10	13	13	15

¹ Veuillez noter que les chiffres sont arrondis et que leur somme ne correspond pas toujours exactement à 100 %.

Il y a eu une diminution spectaculaire de la superficie des terres dans la catégorie de risque très faible au Canada, car elles sont passées de 61 % de la superficie totale en 1981 à seulement 8 % en 2021, tandis que la superficie des terres dans la catégorie de risque faible n'a diminué que de 50 %, passant de 18 % en 1981 à 9 % en 2021. La superficie des terres dans la catégorie de risque modéré a augmenté, passant de 8 % en 1981 à 19 % en 2001, puis a diminué pour s'établir à 11 % en 2021. La proportion de la superficie dans la catégorie de risque élevé a plus que doublé entre 1981 (6 %) et 2021 (17 %), et celle de la superficie dans la catégorie de risque très élevé a été multipliée par 7, passant de 8 % en 1981 à 56 % en 2021.

Ce qui est particulièrement préoccupant, c'est que dans toutes les provinces, plus de 61 % des terres étaient dans les catégories de risque élevé et très élevé et qu'au Manitoba, au Québec et dans toutes les provinces maritimes, plus de 93 % des terres se trouvaient dans ces deux catégories en 2021 (tableau 2). Bien que l'on ait constaté que c'était en 2021 que la concentration d'ARS était la plus élevée au cours de la période de 40 ans, il est à noter que toutes les provinces sauf trois (Alberta, Saskatchewan et Ontario) voyaient la plus grande partie (79-100 %) de leurs terres dans les catégories de risque élevé et très élevé en 2016 également (figure 1, tableau 2).

Options d'intervention

Ces résultats indiquent que dans de nombreuses régions du Canada, les concentrations d'ARS ont augmenté au fil du temps en raison de la hausse des apports d'azote, qui ont augmenté plus rapidement que les pertes. Bien que les pertes d'azote (rendements et absorption d'azote) ont également augmenté, les augmentations sont inférieures aux augmentations des pertes. Il s'agit certainement d'un problème lorsque les conditions de sécheresse ou les pluies excessives limitent le rendement et l'absorption d'azote des cultures, comme cela a été observé lors des années de recensement 2001 et 2021 et au cours de plusieurs autres années sans recensement. Ces tendances à l'augmentation des concentrations d'ARS pourraient être réduites comme suit :

- 1) Améliorer l'efficacité de l'utilisation des engrais azotés par l'adoption de stratégies de gestion des nutriments, notamment par l'utilisation d'inhibiteurs de l'uréase et de la nitrification, l'amélioration de l'épandage, l'amélioration du calendrier d'application des engrais et le calcul du taux (Drury *et al.*, 2017; Woodley *et al.*, 2020, Drury *et al.*, 2024).

- 2) Tenir compte de l'azote disponible provenant d'applications antérieures de fumier ou de cultures de légumineuses selon des analyses du sol ou des plantes en cours de saison en plus de la technologie de cartographie des sols de l'agriculture de précision (Zebarth *et al.*, 2009).
- 3) Incorporer du fumier et des amendements organiques pour réduire au minimum les pertes d'azote par ruissellement, érosion et volatilisation de l'ammoniac (Mencaroni *et al.*, 2021).
- 4) Utiliser des cultures couvre-sol pour capter tout l'azote résiduel à la fin de la période de croissance afin de prévenir les pertes d'azote au cours de l'hiver (Drury *et al.*, 2014).
- 5) Utiliser des capteurs de culture en cours de saison pour ajuster la quantité d'azote appliquée aux cultures avec un épandage d'azote en bandes latérales (Zebarth *et al.*, 2009).
- 6) Explorer les pratiques de gestion, par exemple les rotations de cultures diversifiées ou les pratiques de conservations du sol qui améliorent les paramètres de santé du sol comme le carbone organique du sol et la structure du sol pour favoriser la résilience des plantes dans des conditions météorologiques défavorables (p. ex. sécheresse, pluies excessives) (Agomoh *et al.*, 2020, 2021; Bowles *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2023).

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).
- Agomoh, I.V., Drury, C.F. Phillips, L.A., Reynolds, W.D. et X.M. Yang. 2020. Increasing crop diversity in wheat rotations increases yields bit decreases soil health. *Soil Sci. Soc. Am.* 84 : 170-181.
- Bowles, T.M., Socolar, Y., Calderón, F., Cavigelli, M.A. Culman, S.W. Deen, W., Drury, C.F., Garcia, A., Gaudin, A., Harkom, W.S., Lehman, M., Osborne, S., Robertson, G.P., Salerno, J.D., Schmer, M.R., Strock, J., et A.S. Grandy. 2020. Long-term evidence shows crop rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in North America. *One Earth* 2, 284-293.
- Drury, C.F., Smith, W., Grant, B., Reynolds, W.D., Yang, X. et L.A. Phillips. 2024. Pipes & Valves : Managing crop production and environmental impact by mitigating ammonia, nitrous oxide, and nitrate losses. *Field Crops Research*. 307:109250 [doi.org/10,1016/j.fcr.2024.109250](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109250)
- Drury, C.F., Tan, C.S., Welacky, T.W., Reynolds, W.D., Zhang, T.Q., Oloya, T.O., McLaughlin, N.B. et J.D. Gaynor. 2014. Reducing nitrate loss in tile drainage water with cover crops and watertable management systems. *J. Environ. Qual.* 43 : 587-598.
- Drury, C.F., Yang, J. De Jong, R. Huffman, T. Reid, K. Yang, X. Bittman, S. et R. Desjardins. 2016. Residual Soil Nitrogen Indicator. In *Environmental Sustainability of Canadian Agriculture : Agri-Environmental Indicator Report 4*. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Ontario. In Clearwater, R. L., T. Martin and T. Hoppe (éditeurs) 2016. *Environmental sustainability of Canadian agriculture* : <http://publications.gc.ca/pub?id=9.812827&sl=0>
- 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. *Canadian Journal of Soil Science*. 87: 166-177.
- Drury, C.F., Yang, X.M., Reynolds, W.D., Calder, W., Oloya, T.O. et A.L. Woodley. 2017. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia volatilization, nitrous oxide emissions and increases corn yields. *J. Environ. Qual.* 46 : 939-949.

- Environnement et Changement climatique Canada. Accord de Paris. 2016.
<https://www.canada.ca/en/environnement-climate-change/services/climate-change/paris-agreement.html>
- Fertilizer Canada. Sustainable Farming is The Future. <https://fertilizercanada.ca/our-focus/stewardship/> (consulté le 18 mars 2021)
- Li, Y., Chen, J., Drury, C.F., Liebig, M.A., Johnson, J.M.F., Wang, Zhaozhi, Feng, H. et D. Abalos. 2023. The role of conservation agriculture practices in mitigating N₂O emissions: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*. 43, 63.
<https://doi.org/10.1007/s13593-023-00911-x>
- Mencaroni, M., Dal Ferro, N., Furlanetto, J., Longo, M., Lazzaro, B., Sartori, L., Grant, B.B. Smith, W.N., et F. Morari. 2021. Identifying N fertilizer management strategies to reduce ammonia volatilization : Towards a site-specific approach. *Env. Gestion*. 277 : 111 445.
- Soil Landscapes of Canada Working Group, 2010. Soil Landscapes of Canada v3.2. (digital map and database at 1:1 million scale). Ottawa, Ontario, Canada : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
<https://sis.agr.gc.ca/cansis/nsdb/slc/v3.2/index.html> (consulté le 22 mars 2021)
- Wang, Z., Yang, J.Y., Drury, C.F. et Jiang, R. 2021. 2021. Simulating alfalfa and pasture yields at regional and national scales in Canada from 1981 to 2019. *Agricultural Systems* 191, 103 166. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103166>
- Woodley, A.L., Drury, C.F., Reynolds, W.D., Tan, C.S., Yang, X.M. et T.O. Oloya. 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.
- Woodley, A.L., Drury, C.F., Yang, X.M., Phillips, L.A., Reynolds, W.D., Calder, W. et T.O. Oloya. 2020. Ammonia volatilization, N₂O emissions and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. *Soil Sci. Soc. J.* 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: 10,522 0/0005005005290536.
- Yang, J.Y., Drury, C.F., Jiang, R., Yang, X.M., Worth, D.E., Bittman, S., Grant, B.B., Smith, W.N. et Reid, K., 2023. Simulating nitrogen balance in Canadian agricultural soils from 1981 to 2016. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:797-802. 341, 118 015. <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>.

Zebarth, B.J., Drury, C.F., Tremblay, N. et Cambouris, A.N. 2009. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada. A review : *Can. J. Soil Sci.* 89:113-132.