

9. Fertilité et éléments nutritifs

Principes de gestion optimale des éléments nutritifs

L'utilisation d'engrais donne seulement de bons résultats quand on prend en compte les données sur la fertilité du sol et l'apport en éléments nutritifs du fumier, des résidus de culture et d'autres sources de matière organique. D'une part, dans les champs très pauvres, on a parfois davantage à remettre dans le sol autant, voire plus d'azote, de phosphore et de potassium que ce qui est prélevé par la culture. D'autre part, toute fertilisation de sols déjà très fertiles ou venant de bénéficier d'un apport important en fumier pourrait ne pas être profitable et même nuire aux rendements.

Une bonne gestion de la nutrition des cultures implique non seulement de choisir les bonnes sources d'éléments nutritifs, mais aussi de les épandre au bon dosage, au bon moment et au bon endroit pour optimiser la production culturale et réduire au minimum les répercussions sur l'environnement.

Pour plus d'information sur la gestion des engrais et des éléments nutritifs, voir la publication 611F du MAAARO, *Manuel sur la fertilité du sol*.

Analyse de sol

L'analyse de sol est la méthode la plus précise qui soit pour déterminer les besoins d'une culture en apports supplémentaires d'éléments nutritifs. Elle comporte trois étapes :

1. Le prélèvement d'un échantillon représentatif du champ.
2. L'analyse de l'échantillon de sol à l'aide des méthodes reconnues par le MAAARO.
3. L'établissement des besoins de la culture en apports supplémentaires en fonction des résultats des analyses, dans un souci d'optimisation des rendements.

Autres méthodes d'évaluation des besoins en éléments nutritifs

L'analyse de tissus végétaux est la méthode la plus utilisée en arboriculture fruitière. Dans le cas des grandes cultures et des productions légumières, elle complète l'information fournie par l'analyse de sol. Des signes de carence nutritionnelle sur les feuilles peuvent être de bonnes indications dans certains cas; par contre, en particulier pour le phosphore et le potassium, ils ne sont pas si utiles puisque des pertes de rendement considérables peuvent se produire même avant l'apparition des signes.

On recommande parfois au producteur de remettre dans le sol la quantité d'éléments nutritifs qui a été prélevée par la culture. Cette approche se compare à celle reposant sur la suffisance, où l'on évalue la fertilité du sol et la rentabilité des cultures afin que les champs contiennent assez d'éléments nutritifs pour assurer un rendement économique maximal. Les directives relatives à la fertilité se fondent d'ailleurs sur cette approche. Certains sols renferment suffisamment de phosphore ou de potassium pour tenir de nombreuses années, et un épandage annuel n'est alors pas rentable et peut causer des problèmes environnementaux.

Les analyses de sol faites dans les laboratoires accrédités par le MAAARO constituent, avec les analyses de tissus végétaux et les signes de carence nutritionnelle, le meilleur moyen de déterminer les besoins en engrais d'une culture dans un champ donné. Si le producteur épand du fumier, les analyses de sol l'aideront à déterminer la quantité d'engrais commerciaux dont il aura besoin pour combler les besoins des cultures.

Programme d'analyse de sol du MAAARO

Le programme d'analyse de sol du MAAARO garantit la réalisation d'analyses adéquates qui orienteront les directives sur les besoins en azote, en phosphate, en potasse, en magnésium, en zinc et en manganèse, ainsi que les paramètres concernant la quantité et le type de chaux nécessaire. Les méthodes d'analyse utilisées ont été sélectionnées en raison de leur capacité à donner des résultats exacts pour tous les types de sols que l'on trouve en Ontario. Le tableau 9-1, *Analyses de sol*

reconnues par le MAAARO, dresse la liste des analyses de sol effectuées dans les laboratoires accrédités de l'Ontario.

La teneur en azote des nitrates peut être mesurée à partir d'un échantillon distinct prélevé à 30 cm (12 po) de profondeur. Voir les chapitres 1, *Maïs*, et 4, *Céréales*, pour en savoir plus.

Tableau 9-1 – Analyses de sol reconnues par le MAAARO

Matériaux analysés	Résultats ¹
Sols de grandes cultures, de gazon commercial, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Phosphore biodisponible (extractible à l'aide de bicarbonate de sodium) • Potassium, magnésium (extractible à l'aide d'acétate d'ammonium), manganèse et zinc (indice de pH du sol et extractible) • pH • Besoin en chaux (pH tampon Shoemaker, MacLean et Pratt [SMP])

¹ La teneur en matière organique donne une idée générale de la santé du sol et sert à formuler les recommandations relatives aux herbicides, mais elle n'est pas évaluée dans le cadre des analyses reconnues par le programme.

Se référer à l'annexe C, *Laboratoires accrédités pour les analyses de sol en Ontario*, pour connaître la liste des laboratoires accrédités en Ontario.

Solvants d'extraction utilisés dans les analyses de sol reconnues par le MAAARO

Le phosphore biodisponible est mesuré au moyen d'un extrait de bicarbonate de sodium (aussi appelé méthode Olsen), et le potassium et le magnésium biodisponibles, à l'aide d'un extrait d'acétate d'ammonium. Le manganèse et le zinc sont rapportés sous forme d'indices qui tiennent compte à la fois de la quantité d'éléments nutritifs extraite de la terre et du pH du sol, qui a une énorme incidence sur la quantité d'éléments nutritifs assimilables par les plantes. Les résultats des analyses de sol pour les teneurs en phosphore, en potassium et en magnésium sont donnés en milligrammes par litre de sol (mg/l), ce qui est grosso modo l'équivalent des parties par million (ppm).

Analyses de sol de laboratoires non accrédités

Chaque année, un certain nombre de producteurs demandent au personnel du MAAARO d'interpréter les résultats d'analyses effectuées par des laboratoires non accrédités. Il est possible de déterminer les besoins en phosphate et en potasse, quel que soit le laboratoire, pour autant que les méthodes d'analyse et les unités utilisées soient les mêmes que celles des laboratoires accrédités; rien ne peut toutefois garantir l'exactitude des résultats.

La solution d'extraction du phosphore de la méthode Olsen a un pH de 8,5. Les solutions des méthodes Bray 1 et 2 et Mehlich 3 ont toutes un pH de 2,5 et peuvent surestimer la biodisponibilité du phosphore dans des sols alcalins, car elles solubilisent des formes non assimilables, comme certains phosphates de calcium. La méthode Olsen évalue de manière plus uniforme la biodisponibilité du phosphore dans les différents sols de l'Ontario. Toutefois, la méthode Mehlich 3 permet d'extraire une quantité de potassium comparable à celle extraite au moyen d'acétate d'ammonium.

Pour obtenir l'accréditation du MAAARO, un laboratoire doit respecter les méthodes d'analyse reconnues par le ministère, faire preuve d'une précision analytique acceptable et fournir les directives relatives aux engrais du ministère. Les analyses de sol reconnues par le MAAARO donneront les **directives relatives aux engrais qui conviennent le mieux aux grandes cultures en Ontario**.

Un certain nombre de laboratoires déterminent la capacité d'échange cationique ainsi que la teneur du sol en aluminium, en bore et en cuivre. Or, ces analyses ne sont pas reconnues par le MAAARO parce que rien n'indique qu'elles contribuent à améliorer les directives relatives aux engrais. Des études ont démontré qu'en Ontario, l'utilisation de la capacité d'échange cationique en vue d'ajuster les besoins en potasse peut mener à des directives moins fiables que celles actuellement fournies.

Tableau 9-2 – Directives d'échantillonnage visant à tenir compte des éléments nutritifs appliqués en bandes

Espace entre les bandes	Mise en place	Prélèvement
76 cm (30 po)	Semoir	Une carotte dans la bande pour chaque tranche de 20 carottes hors bande
30 cm (12 po)	Semoir	Une carotte dans la bande pour chaque tranche de 8 carottes hors bande
76 cm (30 po)	Travail du sol en bandes superficiel, injecteurs de fumier	Une carotte dans la zone pour chaque tranche de 3 carottes hors zone, lorsque la zone d'influence a 25 cm (10 po) de largeur
Espace entre les bandes connu; lieu inconnu	Semoir	Échantillons appariés : une carotte prise aléatoirement et une autre à 50 % de la distance d'espacement entre les bandes à partir du premier échantillon, perpendiculairement à la bande
Espace entre les bandes inconnu	Semoir	$S = 8 [x \div 30 \text{ cm}]$ $(S = 8 [x \div 12 \text{ po}])$ S = nombre de carottes prises entre les bandes (hors du rayon d'influence de la bande, qui est de 5 cm si les engrais sont épandus au semoir) x = espace entre les bandes en centimètres ou pouces

Sources : FERNANDEZ. « Assessment of Soil Phosphorus and Potassium following Real Time Kinematic-Guided Broadcast and Deep-Band Placement in Strip-Till and No-Till », 2012.

Étude autonome menant à l'obtention de crédits d'éducation permanente, *Crops & Soils*, édition de juillet-août.

KITCHEN, WESTFALL et HAVLIN. « Soil Sampling Under No-Till Banded Phosphorus », *Soil Science Society of America Journal*, volume 54, 1990, p. 1661 à 1665.

BALL COELHO, ROY, BRUIN, MORE et WHITE. « Zonejection: Conservation tillage manure nutrient delivery system », *Agronomy Journal*, numéro 101, 2009, p. 215 à 225.

Technologies d'échantillonnage du sol

Pour échantillonner le sol, il faut notamment une tarière ou une sonde d'échantillonnage. Dans le cas d'une analyse des oligo-éléments, le tube doit être en acier inoxydable. Il peut être utile d'utiliser un tournevis pour transférer la carotte de sol du tube d'échantillonnage à un contenant, comme un seau de plastique propre. Les échantillons doivent généralement être prélevés à une profondeur de 15 cm (6 po), mais il y a des exceptions. D'abord, les

échantillons d'azote des nitrates doivent être pris à une profondeur de 30 cm (12 po); ensuite, dans des champs en semis direct continu, où de l'azote a été pulvérisé à la volée et où de la chaux sera épandue, les échantillons pour l'analyse du pH doivent être prélevés à une profondeur de 10 cm (4 po).

Un échantillon est un mélange d'au moins 20 différentes carottes de sol représentatif d'une zone donnée. Chaque échantillon peut représenter au maximum 10 ha (25 ac). On doit prélever les carottes en zigzag dans la zone visée; voir à ce sujet la figure 10-1, *Schémas de dépistage*, au chapitre 10, *Dépistage*. Il faut éviter de prélever des carottes aux abords de chemins en gravier et aux endroits où l'on a entassé de la chaux, du fumier, du compost ou des résidus de culture. On doit prendre des échantillons distincts dans des zones suffisamment vastes pour être gérées séparément (p. ex. zones de gestion précises, buttes érodées). Il faut éviter de prélever des carottes dans des bandes fertilisées depuis peu, ou d'en prélever à la distance des bandes indiquée au tableau 9-2, *Directives d'échantillonnage visant à tenir compte des éléments nutritifs appliqués en bandes*.

Si on envoie tout le sol prélevé en laboratoire, il n'y a pas lieu de le mélanger : le personnel de l'établissement s'en chargera. Toutefois, avant de soumettre un sous-échantillon au laboratoire, il faut d'abord bien mélanger la terre, défaire les mottes et retirer les pierres et les résidus de culture. Il faut parfois faire sécher les sols à texture lourde (argileux) pour pouvoir les mélanger et créer des sous-échantillons. On doit envoyer l'échantillon ou le sous-échantillon – environ 400 g (1 lb) de terre – au laboratoire dans un sac étiqueté.

Échantillonnage fondé sur des données géoréférencées ou dirigé

En consignait le lieu d'échantillonnage au moyen de systèmes de localisation GPS, il est plus facile de prendre de nouveaux échantillons au même endroit les années suivantes et de localiser les zones d'échantillonnage ciblées à l'aide de données géoréférencées. Cette pratique permet aussi de créer des cartes pour la tenue de registres pluriannuels et l'épandage localisé d'éléments nutritifs ou de chaux.

Le nombre d'échantillons nécessaire pour évaluer un champ dépend de sa topographie et de la variabilité des sols qui y sont présents, ainsi que du nombre et du type de cultures. Pour diviser des zones de plus

de 10 hectares (25 acres), il faut se fonder sur les anciennes limites du champ ou les différences dans la gestion, comme les épandages précédents d'engrais, de fumier ou de chaux. On doit échantillonner séparément chacune des zones problématiques, ainsi qu'une zone adjacente où la croissance est normale, pour déterminer si les carences en éléments nutritifs nuisent à la croissance des cultures. L'échantillonnage en grille, qui consiste à prélever des carottes dans des espaces placés stratégiquement dans le champ, peut convenir pour créer une base de référence, mais cette méthode ne permet généralement pas de déterminer la variabilité des sols. Il faut intégrer les sous-division des champs aux zones d'échantillonnage selon la variabilité des types de sol, de la texture, de la topographie, du drainage ou des caractéristiques des cultures. On appelle cette pratique l'échantillonnage dirigé ou intelligent.

Il existe beaucoup de paramètres pour décrire la variabilité d'un champ et aussi, par conséquent, un grand nombre de moyens d'établir des zones

d'échantillonnage homogènes dans chaque champ. Une manière simple de procéder est de dessiner grossièrement sur une carte les différences connues en matière de texture, de topographie ou d'antécédents des champs ou d'épandage de fumier, puis d'échantillonner ces zones séparément. Cette méthode ne permet pas de produire automatiquement des cartes d'épandage localisé, mais peut convenir à certaines activités.

L'échantillonnage dirigé peut se fonder sur des cartes de rendement ou altimétriques, ou des mesures venant de capteurs ciblant les cultures ou le sol installés sur la machinerie (habituellement munis d'un GPS). Le tableau 9-3, *Capteurs servant à définir les zones de gestion et paramètres mesurés*, présente en détail les méthodes d'échantillonnage dirigé. La figure 9-1, *Image infrarouge traitée pour montrer l'indice de végétation par différence en vert*, est quant à elle une image du couvert végétal d'une culture prise au moyen d'un capteur optique infrarouge installé sur un véhicule aérien sans pilote (UAV).

Tableau 9-3 – Capteurs servant à définir les zones de gestion et paramètres mesurés

Plateforme	Capteur	Mesure	Indications sur le sol ou la culture
Capteurs au sol	Capteur optique (cultures)	Réflexion d'ondes infrarouges et proches infrarouges (fabricants : OptTRx, GreenSeeker)	Produit un indice de végétation par différence normalisée (IVDN), une indication de la biomasse présente à la surface.
	Capteur de profondeur de champ électromagnétique secondaire (sol)	Conductivité électrique (fabricants : EM38, Veris Industries, DUALEM, Soil Doctor)	Capacité d'échange cationique, argile, eau dans le sol, concentration en sodium. On peut utiliser l'exemple pour créer une carte des types de sol présents dans un champ.
	Capteur optique (sol)	Réflexion d'ondes proches infrarouges (700 à 900 nm)	Carbone organique, capacité d'échange cationique, eau dans le sol
Télédétection • Satellite • Avion • Véhicule aérien sans pilote (UAV)	Capteur optique (rayonnement électromagnétique)	Absorption et réflexion de la lumière par le sol et les plantes Plusieurs fourchettes d'ondes mesurées : • Ondes visibles (400 à 700 nm); • Ondes infrarouges (700 à 1 000 nm); • Ondes multispectrales (> 1 longueur d'onde) : bleu, vert, rouge, proche infrarouge – bandes de 50 à 120 nm; • Ondes hyperspectrales : spectre complet – bandes étroites (1 à 15 nm).	Éléments visibles : structure et santé de la plante, stress, volume, couleur du sol. Imagerie multispectrale : on utilise souvent les verts, l'infrarouge et le proche infrarouge pour créer des indices de végétation, p. ex. l'IVDN. Imagerie hyperspectrale : santé des cultures, humidité du couvert végétal, carences en éléments nutritifs.
	Capteur thermique	Rayonnement thermique – température	Santé des plantes et stress
	Radar (détection et télémétrie par radioélectricité)	Rétrodiffusion (fourchette et magnitude de l'énergie réfléchie) de rayonnement hyperfréquence; images de deux ou trois dimensions	Type de sol, minéraux, humidité, volume, santé et stress
	Lidar (détection et télémétrie par ondes lumineuses)	Délai entre l'envoi de l'impulsion laser vers la cible (sol) et son retour au capteur	Topographie haute résolution, structure de la végétation, calcul du volume des cultures

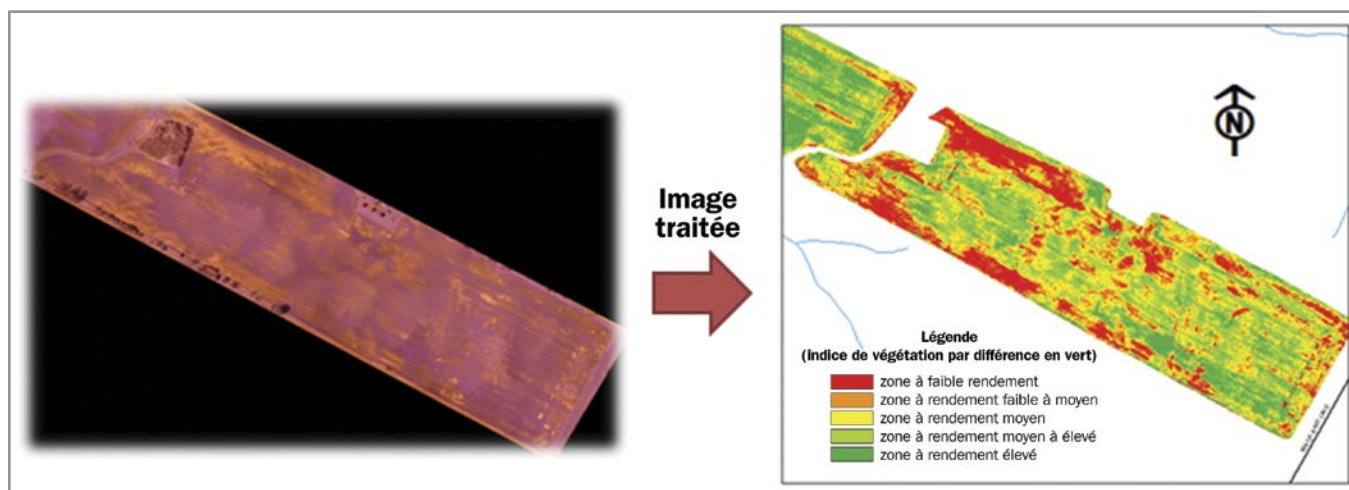


Figure 9-1 – Image infrarouge traitée pour montrer l’indice de végétation par différence en vert

On a transformé l’image en fausses couleurs (en haut à gauche) en indice de végétation par différence présenté en vert (en haut à droite) afin d’établir les zones d’échantillonnage devant être vérifiées dans le champ (réalité de terrain) ou étayées par d’autres données (p. ex. cartes de rendement).

Il faut savoir que la corrélation entre les mesures et les extrants cartographiés n’est pas toujours bien définie, comme quand on utilise des capteurs évaluant un paramètre pour produire des cartes traitant d’autres propriétés qui ont une corrélation faible ou inconnue avec le paramètre. En pareil cas, il faut prélever des échantillons de sol ou de tissus végétaux dans le champ pour vérifier les données des capteurs visant à cartographier des caractéristiques précises du sol ou des cultures.

Zones d’échantillonnage du sol (zones de gestion)

Zones de rendement pluriannuelles

Si les tendances liées au rendement sont stables depuis plusieurs années, on peut établir des zones en fonction des rendements normalisés. Normaliser les rendements, c’est déterminer dans quelle mesure le rendement est supérieur ou inférieur à la moyenne du champ. Chaque année, les zones sont classées en fonction de leur rendement faible, moyen ou élevé. On peut préparer des cartes de rendement normalisé pour la rotation en englobant tous les types de cultures, ou en analysant une même culture pendant un certain nombre d’années. En pareil cas, les zones d’échantillonnage se fondent uniquement sur les rendements. Souvent, pour les définir, on combine les

cartes de rendement avec d’autres cartes ou diverses connaissances du producteur.

La figure 9-2, *Carte topographique de zones d’échantillonnage définies selon le relief*, illustre une stratégie d’échantillonnage efficace qui fait bien correspondre la productivité des cultures avec la topographie. On peut obtenir des données altimétriques notamment au moyen du GPS d’un instrument agricole ayant de préférence un signal de qualité. Il faut exploiter le matériel qui passe le plus souvent dans le champ pour dresser un portrait complet de la variabilité topographique. À la figure 9-2, on a utilisé un ensemble de données altimétriques provenant d’un semoir de 12 m (40 pi) guidé par un système de positionnement cinématique en temps réel (RTK) et un GPS pour établir des zones d’échantillonnage et ensuite les représenter en trois dimensions. Les échantillons composites sont prélevés dans trois différentes zones topographiques qui ont un bon drainage (butte), un mauvais drainage (faible dépression) ou un drainage non uniforme (pente sur le côté). On mélange les carottes pour obtenir un échantillon par catégorie de relief, en présumant que la texture est similaire dans toute la zone.

Utilisation des résultats des analyses de sol

Les résultats des analyses de sol peuvent servir à définir des zones de gestion pour l’épandage d’éléments nutritifs et de chaux. Si les besoins des différentes zones d’échantillonnage sont identiques ou sensiblement les mêmes, on peut les fusionner pour créer de grandes zones de gestion. Les zones de gestion du sol doivent présenter des besoins en éléments nutritifs semblables

et être suffisamment vastes pour que l'on puisse utiliser efficacement le matériel d'épandage sur place. On doit employer un système d'information géographique (SIG) pour créer des cartes de prescription d'épandage d'éléments nutritifs ou de chaux et ainsi adapter la dose d'épandage. Il faut copier la carte de prescription dans le logiciel du tracteur ou du doseur et ajuster la dose comme il se doit pendant que la machine circule dans le champ. On peut en outre varier la dose d'épandage en fonction d'autres facteurs : par exemple, on peut réduire la quantité d'éléments nutritifs à épandre dans les zones à faible rendement présentant les mêmes résultats d'analyses de sol que ceux de zones à fort rendement pour compenser la faible absorption des éléments nutritifs. Si c'est un problème d'eau et non la fertilité du sol qui réduit les rendements, il peut être plus profitable d'épandre moins d'engrais dans les zones à texture grossière du champ, même si les recommandations liées aux éléments nutritifs découlant des analyses de sol sont les mêmes.

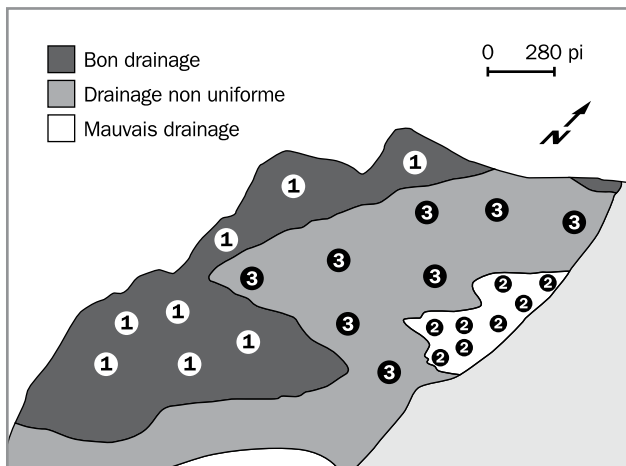


Figure 9-2 – Carte topographique de zones d'échantillonnage définies selon le relief

Fréquence de l'échantillonnage

Il faut prélever des échantillons dans les champs assez souvent pour détecter les changements qui s'opèrent dans le sol avant qu'ils commencent à influencer considérablement le rendement des cultures ou les besoins en engrais. La réalisation d'un échantillonnage aux trois ans convient à la plupart des exploitations agricoles. L'analyse est souvent réalisée une fois par cycle de rotation, toujours au même stade. Lorsqu'une grande quantité de potassium est prélevée (p. ex. luzerne à fort rendement, maïs à ensilage), la teneur du sol en cet élément nutritif peut changer rapidement; il faut donc échantillonner le sol plus souvent.

Moment de l'année

Compte tenu des délais de transport et d'analyse, il faut prendre les échantillons à l'automne, avant de fertiliser les champs pour les cultures semées au printemps. Toutefois, vu le surcroît de travail au moment des récoltes et la fréquence des pluies à cette période de l'année, l'été est parfois un meilleur moment. En prenant des échantillons à la même période chaque année, on peut faire un suivi plus précis des tendances au fil du temps.

Boîtes à échantillons et feuilles de renseignements

On peut obtenir des boîtes à échantillons de sol, des feuilles de renseignements ainsi que le prix des différentes analyses auprès des laboratoires accrédités ou de nombreux fournisseurs d'engrais et de produits agricoles.

Les pratiques de gestion comme l'épandage de fumier et l'enfouissement de foin de légumineuses peuvent avoir une incidence sur les résultats des analyses de sol et sur les besoins en engrais. Essentielles à la création d'un équilibre entre les réserves d'éléments nutritifs et les besoins des cultures, les données de gestion doivent être consignées dans la feuille de renseignements sur le champ qui accompagne les échantillons de sol soumis pour analyse.

Analyse des oligo-éléments

Les analyses de sol reconnues par le MAAARO peuvent aussi indiquer la teneur du sol en zinc et en manganèse. Dans le cas du zinc, pour la culture du maïs, la meilleure méthode consiste à associer les résultats d'analyse avec les signes de carence. Pour ce qui est du manganèse, l'analyse des tissus, les signes de carence et l'analyse de sol sont tous utiles. Par contre, il n'y a pas d'analyses reconnues par le MAAARO pour le bore, le cuivre, le fer et le molybdène, car les analyses actuelles ne permettent pas de bien évaluer leur biodisponibilité. En général, les analyses des tissus végétaux donnent une meilleure indication des carences en ces éléments.

Contamination

Certaines précautions s'imposent si on ne veut pas fausser les résultats des analyses de sol par le contact des échantillons avec des oligo-éléments, en particulier le zinc. C'est pourquoi il ne faut pas utiliser de sondes à tube galvanisé (plaqué de zinc) pour échantillonner un sol dans lequel on veut déterminer les teneurs en oligo-éléments. Il faut également éviter de recueillir et de mélanger les échantillons dans des contenants en métal, et utiliser plutôt des contenants en plastique propres.

Échantillonnage du sol

Dans les champs, les carences en oligo-éléments se présentent fréquemment sous forme de petits îlots. En pareil cas, les échantillons de sol ou de tissus végétaux pris à la grandeur du champ ne permettront probablement pas de déceler le problème. Il faut prélever des échantillons distincts dans les secteurs qui semblent présenter des carences et dans ceux qui n'en présentent pas afin de pouvoir comparer les résultats d'analyse.

Analyse des tissus végétaux

L'analyse des tissus végétaux permet de mesurer la teneur en éléments nutritifs des tissus d'une plante. En comparant les résultats aux valeurs « normales » et « critiques » pour une culture donnée, on peut déterminer si l'apport en éléments nutritifs est propice à la croissance optimale de la plante.

C'est sur l'analyse des tissus végétaux que reposent les recommandations d'engrais pour les arbres fruitiers et la vigne. Par ailleurs, elle complète les renseignements fournis par l'analyse de sol quand il s'agit d'évaluer le niveau de fertilité pour d'autres cultures. Indépendante de l'analyse de sol, elle permet de vérifier l'exactitude des teneurs en phosphore, en potassium, en magnésium et en manganèse. Elle n'indique pas toutefois de manière fiable les teneurs du sol en azote et en zinc. Pour le bore et le cuivre, il n'existe pas d'analyses de sol concluantes, donc l'analyse des tissus végétaux et le repérage des signes de carence sur la plante restent les seuls moyens de diagnostiquer de telles carences.

L'analyse des tissus végétaux a aussi ses limites. Il est souvent difficile d'en interpréter les résultats, car elle n'indique généralement pas la cause de la carence ni la quantité d'engrais nécessaire pour la suppléer. Elle est surtout utile lorsqu'elle est combinée à l'inspection visuelle de l'état de la culture et du sol, à la connaissance des pratiques culturales utilisées antérieurement et à une analyse de sol récente qui indique les teneurs en éléments nutritifs et le pH du sol.

En Ontario, il n'existe aucun processus officiel d'accréditation des laboratoires d'analyse des tissus végétaux. Cependant, les laboratoires accrédités en analyse de sol qui exécutent des analyses de tissus font l'objet d'une surveillance, et chacun d'eux est en mesure d'effectuer une analyse valable des tissus végétaux et de bien interpréter les résultats.

Échantillonnage

Le moment où l'on effectue le prélèvement des tissus a une grande incidence sur les résultats, car les teneurs en éléments nutritifs de la plante varient considérablement selon son âge. On présente les stades de croissance recommandés dans les chapitres consacrés aux différentes cultures. Les résultats seront difficiles à interpréter si les échantillons sont pris à des moments autres que ceux recommandés. Il faut toutefois échantillonner les plants soupçonnés de carence en éléments nutritifs dès que le problème se manifeste. Il est préférable de prélever les échantillons aux endroits précis où il y a des signes de carence plutôt que dans le champ tout entier, et il est souvent utile de recueillir aussi des échantillons de plantes saines dans un secteur adjacent à des fins de comparaison.

On doit prélever des échantillons de tissus sur au moins 20 plants répartis un peu partout dans la zone choisie. Chaque échantillon doit se composer d'au moins 100 g (3,5 oz) de tissus frais et être exempt de toute contamination avec de la terre, car même une infime quantité de terre peut fausser les résultats, surtout lorsque l'analyse porte sur les oligo-éléments. Il faut aussi échantillonner en même temps des zones déficientes et en bonne condition pour établir un diagnostic.

Préparation de l'échantillon

Les échantillons de tissus végétaux fraîchement prélevés doivent être expédiés directement au laboratoire. Si l'expédition ne se fait pas dans l'immédiat, il faut faire sécher les tissus végétaux pour éviter qu'ils se détériorent. On peut faire sécher les échantillons au four à 65 °C ou moins, ou au soleil en prenant soin qu'aucune particule de terre ou de poussière ne puisse les contaminer. Il faut éviter tout contact des tissus avec des contenants galvanisés (plaqués de zinc) ou faits de cuivre ou de laiton.

Directives relatives aux engrais

Acidité du sol et chaulage

L'échelle de pH, qui s'étend de 0 à 14, sert à définir le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol. Le sol est neutre s'il a un pH de 7,0, est acide si son pH est inférieur à 7,0 et est alcalin si son pH est supérieur à 7,0. La plupart des grandes cultures poussent bien lorsque le pH se situe entre 6,0 et 8,0.

Pour modifier l'acidité du sol, on peut épandre à la volée de la chaux moulue et l'enfouir dans le sol, aux doses déterminées selon les résultats d'analyses du sol. Le tableau 9-4, *Directives de chaulage pour les cultures de l'Ontario*, indique le pH au-dessous duquel le chaulage est recommandé, ainsi que la valeur cible selon la culture. En Ontario, la plupart des cultures poussent bien à un pH plus élevé que celui où le chaulage est recommandé. Le pH du sol est une mesure du degré d'acidité du sol et indique si le chaulage est nécessaire à la culture. Il ne permet pas d'évaluer la quantité d'acidité de réserve.

pH tampon

Le pH tampon est la quantité d'acidité de réserve maintenue dans l'argile et les particules de matière organique dans le sol à partir de laquelle on déterminera la quantité de chaux nécessaire. Des quantités différentes d'acidité de réserve signifient que deux sols présentant le même pH auront besoin de quantités différentes de chaux pour redresser le pH à la valeur voulue. Plus la quantité d'acidité de réserve est grande, moins le pH tampon est élevé et plus il faut de chaux pour augmenter le pH. À l'aide du tableau 9-4 *Directives de chaulage pour les cultures de l'Ontario*, on peut déterminer la quantité de chaux dont ont besoin les sols qui en manquent pour atteindre les différents pH cibles.

Qualité de la chaux

La chaux calcitique contient surtout du carbonate de calcium, et la chaux dolomitique, des carbonates de magnésium et de calcium. Il faut utiliser la chaux dolomitique sur les sols dont la teneur en magnésium est de 100 ou moins, car c'est une excellente source de magnésium bon marché pour les sols acides. Dans les sols dont l'analyse révèle une teneur en magnésium supérieure à 100, les deux types de chaux peuvent être utilisés.

L'efficacité de la chaux dépend de deux facteurs importants : la valeur neutralisante et la finesse de mouture. La valeur neutralisante de la chaux est sa capacité à neutraliser l'acidité du sol lorsqu'elle est complètement dissoute. On l'exprime en pourcentage de la valeur neutralisante du carbonate de calcium pur. Un échantillon de chaux qui neutralise 90 % de l'acidité possède une valeur neutralisante de 90. En général, plus la chaux contient de calcium et de magnésium, plus sa valeur neutralisante est élevée. Voir à ce sujet le tableau 9-5, *Quantité de chaux nécessaire pour corriger l'acidité du sol en fonction du pH et du pH tampon*.

Tableau 9-4 – Directives de chaulage pour les cultures de l'Ontario

Type de sol	Cultures	pH au-dessous duquel le chaulage est bénéfique	pH cible ¹
Sols minéraux à texture grossière ou moyenne (sables, loams sableux, loams et loams limoneux)	Légumineuses vivaces, avoine, orge, blé, triticales, haricots, pois, canola, lin, tomates, framboises, fraises, et toute autre culture qui ne figure pas ci-dessous	6,1	6,5
	Maïs, soya, seigle, foin de graminées, pâturage, tabac	5,6	6,0
	Pommes de terre	5,1	5,5
Sols minéraux à texture fine (argiles et loams argileux)	Luzerne, choux, rutabagas	6,1	6,5
	Autres légumineuses vivaces, avoine, orge, blé, triticales, soya, haricots, pois, canola, lin, tomates, framboises, et toute autre culture qui ne figure ni ci-dessus, ni ci-dessous	5,6	6,0
	Maïs, seigle, foin de graminées, pâturage	5,1	5,5
Sols organiques (tourbe et terre noire)	Toutes les grandes cultures et les cultures légumières	5,1	5,5

¹ Quand la culture est en rotation avec d'autres cultures nécessitant un pH plus élevé (par exemple le maïs en rotation avec le blé ou la luzerne), il est recommandé de chauler le sol afin d'atteindre le pH le plus élevé.

Tableau 9-5 – Quantité de chaux nécessaire pour corriger l'acidité du sol en fonction du pH et du pH tampon

Chaux moulue nécessaire – t/ha (t. c./ac) (en fonction d'un indice agricole de 75)				
pH tampon ¹	pH cible			
	7,0	6,5 ²	6,0 ³	5,5 ⁴
7,0	2 (0,9)	2 (0,9)	1 (0,5)	1 (0,5)
6,9	3 (1,3)	2 (0,9)	1 (0,5)	1 (0,5)
6,8	3 (1,3)	2 (0,9)	1 (0,5)	1 (0,5)
6,7	4 (1,8)	2 (0,9)	2 (0,9)	1 (0,5)
6,6	5 (2,2)	3 (1,3)	2 (0,9)	1 (0,5)
6,5	6 (2,7)	3 (1,3)	2 (0,9)	1 (0,5)
6,4	7 (3,1)	4 (1,8)	3 (1,3)	2 (0,9)
6,3	8 (3,6)	5 (2,2)	3 (1,3)	2 (0,9)
6,2	10 (4,5)	6 (2,7)	4 (1,8)	2 (0,9)
6,1	11 (4,9)	7 (3,1)	5 (2,2)	2 (0,9)
6,0	13 (5,8)	9 (4,0)	6 (2,7)	3 (1,3)
5,9	14 (6,2)	10 (4,5)	7 (3,1)	4 (1,8)
5,8	16 (7,1)	12 (5,4)	8 (3,6)	4 (1,8)
5,7	18 (8,0)	13 (5,8)	9 (4,0)	5 (2,2)
5,6	20 (8,9)	15 (6,7)	11 (4,9)	6 (2,7)
5,5	20 (8,9)	17 (7,6)	12 (5,4)	8 (3,6)
5,4	20 (8,9)	19 (8,5)	14 (6,2)	9 (4,0)
5,3	20 (8,9)	20 (8,9)	15 (6,7)	10 (4,5)
5,2	20 (8,9)	20 (8,9)	17 (7,6)	11 (4,9)
5,1	20 (8,9)	20 (8,9)	19 (8,5)	13 (5,8)
5,0	20 (8,9)	20 (8,9)	20 (8,9)	15 (6,7)
4,9	20 (8,9)	20 (8,9)	20 (8,9)	16 (7,1)
4,8	20 (8,9)	20 (8,9)	20 (8,9)	18 (8,0)
4,7	20 (8,9)	20 (8,9)	20 (8,9)	20 (8,9)
4,6	20 (8,9)	20 (8,9)	20 (8,9)	20 (8,9)

¹ En Ontario, le pH tampon est mesuré au moyen du tampon Shoemaker, MacLean et Pratt (SMP). D'autres territoires peuvent utiliser des tampons différents qui donnent des résultats similaires, mais non identiques.

² Chaulage nécessaire si le pH est inférieur à 6,1.

³ Chaulage nécessaire si le pH est inférieur à 5,6.

⁴ Chaulage nécessaire si le pH est inférieur à 5,1.

Le deuxième facteur qui influe sur le pouvoir neutralisant de la chaux est la finesse de sa mouture. En effet, une pierre à chaux a une surface de contact avec l'acidité du sol bien moins grande que si elle est réduite en poudre; pour cette raison, elle neutralise beaucoup moins vite l'acidité et, à toutes fins utiles, a peu de valeur. Le calcul de la cote de finesse de la chaux moulue est illustré au tableau 9-6, *Exemple de calcul de la finesse de mouture de la chaux.*

Tableau 9-6 – Exemple de calcul de la finesse de mouture de la chaux

Taille des particules	% de l'échantillon	x	Facteur d'efficacité	=	Cote	
Plus grosses qu'un tamis n° 10 ¹	10 %	x	0	=	0	
Tamis n° 10 à 60 ²	40 %	x	0,4	=	16	
Plus petites qu'un tamis n° 60	50 %	x	1,0	=	50	
Cote de finesse					=	66

¹ Un tamis Tyler n° 10 a des mailles de 2,0 mm.

² Un tamis Tyler n° 60 a des mailles de 0,25 mm.

Indice agricole

Un indice agricole de la chaux a été mis au point en Ontario pour permettre la comparaison de chaux ayant une valeur neutralisante et une finesse de mouture différentes.

$$\text{Indice agricole} = \frac{\text{Valeur neutralisante x finesse de mouture}}{100}$$

L'indice agricole peut servir à comparer l'efficacité relative de différentes chaux à neutraliser l'acidité du sol. La chaux possédant un indice agricole élevé vaut proportionnellement plus que la chaux possédant un indice plus faible, car elle peut être appliquée à des doses inférieures.

Par exemple, si deux pierres à chaux moulues, A et B, ont des indices agricoles de 50 et 80 respectivement, la dose de A requise pour certains sols sera de 80/50 fois la dose de B. Donc, la chaux A vaut 50/80 fois le prix de la chaux B par tonne.

Les directives associées aux analyses du pH et du pH tampon du sol reconnues par le MAAARO se fondent sur une chaux ayant un indice agricole de 75. Si l'indice agricole de la chaux est connu, on peut calculer la dose précise pour une chaux de cette qualité à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Taux de chaulage selon l'analyse de sol} \times \frac{75}{\text{Indice agricole de la chaux}} = \text{Dose de chaulage}$$

Par exemple, si la dose requise, d'après l'analyse de sol, est de 9 t/ha (4 t. c./ac) et que la chaux offrant le meilleur rapport qualité-prix possède un indice agricole de 90, il faudra appliquer 7,5 t/ha, ou 3,3 t. c./ac ($75/90 \times 9$).

L'indice agricole ne fournit aucune indication sur la teneur en magnésium de la chaux. Il faut utiliser de la chaux dolomitique sur les sols pauvres en magnésium.

Profondeur du travail du sol

La quantité de chaux indiquée au tableau 9-5, *Quantité de chaux nécessaire pour corriger l'acidité du sol en fonction du pH et du pH tampon*, devrait élever le pH des 15 premiers cm (6 po) de sol au pH cible précisé. Si le sol est labouré à une profondeur supérieure ou inférieure à 15 cm (6 po), il faut proportionnellement plus ou moins de chaux pour atteindre le même pH cible. Quand on réduit la profondeur de travail du sol, on doit diminuer la dose proportionnellement. Un chaulage plus fréquent sera alors nécessaire. Pour des champs en semis direct où des engrais ont été épandus à la surface, il faut prendre des échantillons dans les premiers 10 cm (4 po) du sol pour déterminer le pH, et épandre les deux tiers de la dose indiquée au tableau 9-5.

Diminution du pH du sol

Lorsque le pH est inférieur à 6,5, il est possible d'abaisser le pH (rendre le sol plus acide) en lui ajoutant du soufre ou du sulfate d'ammonium. Cet apport peut être opportun pour certaines cultures, notamment pour lutter contre la galle de la pomme de terre, mais, en général, il ne convient pas aux cultures de rotation. On ne peut pas faire alterner le pH du sol, de faible à moyen, d'une année à l'autre. Si le pH du sol est supérieur à 6,5, il est déconseillé – et habituellement très peu pratique – d'abaisser le pH en raison des grandes quantités de soufre ou de sulfate d'aluminium nécessaires.

Azote

Les directives relatives aux engrais azotés pour les grandes cultures figurent dans les tableaux de la section *Gestion de la fertilisation* de chaque chapitre consacré à une culture. Les doses sont diminuées quand on épand du fumier ou si la culture précédente comprenait des légumineuses vivaces comme la luzerne.

Afin de préserver la qualité de la culture et d'éviter toute pollution de l'eau souterraine, il faut s'assurer que l'apport total en azote biodisponible provenant

notamment d'engrais, de fumier, de biosolides et de résidus n'excède jamais les besoins de la culture.

Phosphate et potasse

Les directives relatives au phosphate et à la potasse se fondent sur les résultats des analyses de sol reconnues par le MAAARO. Les besoins des cultures en ces deux éléments nutritifs sont présentés à la section *Gestion de la fertilisation* de chaque chapitre consacré à une culture. On doit utiliser ces tableaux uniquement avec les résultats d'analyses de sol reconnues par le MAAARO. Les analyses non accréditées peuvent utiliser des solvants d'extraction qui retirent des quantités différentes d'éléments nutritifs; leurs résultats ne peuvent donc pas être interprétés convenablement avec les tableaux du MAAARO.

Teneur du sol en phosphore

Il faut bien lire les résultats de l'analyse utilisant la méthode Olsen (bicarbonate de sodium) pour évaluer la teneur en phosphore. On ne peut pas se fonder sur d'autres méthodes, comme les Bray ou le Mehlich 3, pour déterminer les recommandations en matière d'engrais en fonction des sections *Gestion de la fertilisation* de la présente publication.

Un examen a été réalisé en 2015 sur les recommandations liées au phosphate et à la potasse en Ontario. L'exercice consistait à cibler 368 essais provinciaux menés de 1969 à 2013 sur le rendement de cultures recevant des engrais de phosphore et de potassium. Il en est ressorti que le rendement économique du maïs, du soya, du blé et de la luzerne était habituellement faible quand le sol avait une teneur en phosphore de plus de 12 ppm (méthode Olsen) ou une teneur en potassium de plus de 100 ppm (*An Ontario P + K Database to Affirm and Update BMPs in Field Crop Production Systems*, Janovicek et coll., 2015). En pareil cas, c'est une dose d'épandage de 20 kg/ha (18 lb/ac) de P_2O_5 et de 20 à 30 kg/ha (18 à 27 lb/ac) de K_2O qui donnait généralement les meilleurs rendements économiques. À la lumière de ces résultats, les auteurs de l'examen ont indiqué qu'une teneur en phosphore de 12 à 18 ppm et en potassium de 100 à 130 ppm constituait la fourchette de valeurs optimale. À ce jour, aucune analyse économique complète n'a été réalisée en Ontario concernant la rentabilité à long terme du maintien du sol au-dessus des teneurs en phosphore et en potassium susmentionnées.

Réserves de phosphore dans le sol

Le phosphore du sol a trois « réserves » principales :

Phosphore en solution : phosphore se trouvant dans l'eau du sol. Il ne représente qu'une infime portion de tout le phosphore dans le sol, soit généralement moins de 1,12 kg/ha (1 lb/ac).

Phosphore actif : phosphore à l'état solide qui alimente la réserve de phosphore en solution. Principale source de phosphore biodisponible pour les cultures, il provient de minéraux (p. ex. phosphate de calcium), de phosphore inorganique attaché aux particules de sol, et de phosphore minéralisé à partir de matière organique.

Phosphore fixé : phosphate inorganique non biodisponible et phosphore organique qui ne minéralise pas. Il peut demeurer des années dans le sol sans jamais devenir assimilable par les plantes.

Source : *The Nature of Phosphorus in Soils*, Busman et coll., 2009. www.extension.umn.edu

La surveillance régulière du sol au moyen d'analyses et le maintien de teneurs raisonnables en éléments nutritifs jouent un rôle important dans la gestion des risques associés à une exploitation agricole. Il importe également de noter que les résultats des analyses de sol ne sont qu'une estimation de la biodisponibilité des éléments nutritifs. Dans le cas du phosphore et du potassium, la valeur indiquée dans l'analyse de sol correspond à la proportion de ces éléments nutritifs qui est biodisponible, soit un petit pourcentage de la quantité totale présente dans le sol. Par exemple, pour le phosphore, la valeur équivaut à la quantité de phosphate que les plantes peuvent, de façon modérée, assimiler dans l'immédiat, soit le phosphore en solution et une partie du phosphore actif (voir la barre sur le côté). Les engrais phosphatés épandus sont hautement solubles et intègrent d'abord la réserve en solution; toutefois, une partie de ces engrais, à la suite d'une réaction chimique, intégrera la réserve de phosphore fixé, qui n'est pas assimilable par les plantes. En raison de la nature réactive et non mobile du phosphate, il est plus efficace de l'épandre en bandes près des racines des cultures pour qu'il soit absorbé au maximum au cours de l'année d'épandage.

Un sol fertile a nécessairement une bonne structure. Ainsi, un réseau de racines étendu permet à la culture d'absorber les éléments nutritifs d'un plus

grand volume de sol, ce qui est particulièrement important dans le cas d'éléments non mobiles comme le phosphate. Un sol sain et ayant une bonne structure recyclera mieux les éléments nutritifs, ce qui améliorera l'apport en éléments nutritifs, notamment le phosphore et le potassium, provenant de la décomposition des résidus, de la matière organique et des minéraux du sol.

Sans analyse de sol, on peut se faire une idée générale des besoins à l'aide des tableaux de directives relatives au phosphate et à la potasse. Il suffit de suivre les consignes suivantes :

- Si le champ est fertilisé régulièrement depuis de nombreuses années ou s'il a été fortement fertilisé au cours des dernières années, il faut utiliser la dose de phosphate et de potasse recommandée pour la cote moyenne (RM).
- Si le champ a reçu peu d'engrais par le passé, on doit utiliser l'une des doses recommandées pour une cote élevée (RÉ).
- Les sols dont la cote du phosphore est nulle (RN) contiennent beaucoup plus de phosphore biodisponible qu'il est nécessaire pour la plupart des cultures.

Il n'est pas conseillé d'épandre du phosphore, que ce soit sous forme d'engrais, de compost, de fumier ou de biosolides, car cela pourrait réduire les rendements ou la qualité de la culture. Ainsi, des apports en phosphate peuvent entraîner des carences en zinc dans les sols pauvres en cet élément nutritif et augmenter les risques de pollution de l'eau.

Le risque de contamination des eaux de surface par le phosphore est plus grand si la teneur en phosphore est plus élevée selon l'analyse de sol. Comme le phosphore se lie fortement aux particules de sol, le déplacement de ces dernières hors du champ par érosion constitue aussi un risque important de contamination. C'est pourquoi la contamination des eaux de surface par le phosphore ne peut être évaluée uniquement d'après la teneur en phosphore indiquée dans l'analyse de sol. Si les résultats des analyses de sol donnent une cote d'efficacité très faible ou nulle aux apports en phosphore, il faut alors appliquer toute source de phosphore en se basant sur un indice-phosphore. Il convient de se référer au logiciel NMAN ou à la fiche technique du MAAARO, *Détermination de l'indice-phosphore dans un champ*, tous deux disponibles à l'adresse ontario.ca/omafra. L'indice-phosphore indique le risque relatif de contamination des eaux de surface selon les applications

effectuées dans un secteur particulier du champ. Il définit également les doses maximales d'application, si du fumier a été épandu, et une distance de retrait minimale par rapport aux cours d'eau.

Magnésium

Le magnésium est un élément nutritif présent naturellement en abondance dans beaucoup de sols en Ontario. Bien que rares, les sols dont la teneur en magnésium est inférieure à 20 ppm, selon les résultats d'analyses du MAAARO, ont besoin d'un apport en magnésium pour supporter la plupart des cultures. Lorsque le pH du sol est inférieur à 6,0, et la teneur en magnésium, à 100 ppm, l'épandage de chaux dolomitique constitue le moyen le plus efficace et économique de suppléer une carence en magnésium. Dans les sols plus riches en magnésium, il faut utiliser soit de la chaux dolomitique, soit de la chaux calcitique pour corriger le pH. Dans les sols où le pH est supérieur à 6,0 et où la concentration de magnésium est de 20 ppm ou moins, l'apport en magnésium peut provenir de sulfate de magnésium ou de sulfate de potasse et de magnésie (mélange de sulfate de potassium et de sulfate de magnésium). Il faut épandre 30 kg de magnésium soluble par hectare (27 lb/ac). Soulignons que ces dernières solutions sont habituellement plus coûteuses que l'épandage de chaux dolomitique comme source de magnésium.

Puisque le potassium et le magnésium entrent en concurrence au niveau de l'absorption par les plantes, l'épandage de potasse peut entraîner une carence en magnésium ou aggraver une carence existante. On doit donc vérifier la teneur du sol en potassium et faire preuve de vigilance lorsqu'on fournit un engrais potassique à des sols pauvres en magnésium.

Sur un certain nombre de sols de l'Ontario, les cultures ont une concentration en magnésium tellement basse que la santé du bétail qui se nourrit de ces végétaux en souffre, même si la croissance des plantes ne semble nullement affectée. Dans de tels cas, il coûte habituellement beaucoup moins cher de suppléer la carence dans la ration du bétail que par la fertilisation du sol. Il faut surveiller attentivement la teneur du sol en potassium et n'épandre que la quantité de potasse requise selon les résultats de l'analyse de sol.

Calcium

Les carences en calcium ne causent pas d'ennuis dans les sols de l'Ontario dont le pH convient aux grandes cultures.

Soufre

Le soufre, qui provient des pluies acides et est fourni par le fumier et la décomposition de la matière organique, suffit souvent à répondre aux besoins des cultures. Toutefois, les carences en cet élément nutritif sont en hausse en raison de la baisse de l'apport des dépôts atmosphériques. L'apport en soufre venant des précipitations a diminué de plus de 5 kg/ha au cours des 20 dernières années. Dans de nombreux essais, le rendement des cultures augmente après l'épandage de soufre, surtout dans le cas du canola, de la luzerne, des cultures fourragères et du blé. Pour combler les besoins en soufre, on a recours à du sulfate d'ammonium, à du sulfate de calcium (gypse), à de l'hyposulfite d'ammonium, à du sulfate de potassium ou à du soufre élémentaire, qui doit être oxydé sous la forme de sulfate pour que les végétaux puissent l'absorber. Il faut épandre le soufre élémentaire quelques mois avant de planter une culture ayant besoin de cet élément nutritif, ou à l'automne dans le cas d'une culture de luzerne établie.

Oligo-éléments

Il faut épandre des oligo-éléments seulement lorsque l'expérience en montre la nécessité ou sur les conseils d'une personne compétente. En général, il est préférable de faire l'épandage pendant les travaux de préparation du sol, et les pulvérisations foliaires, durant la saison de croissance. On doit ajouter un produit mouillant adhésif dans les solutions d'oligo-éléments pulvérisées directement sur le feuillage.

Il ne faut pas mélanger d'oligo-éléments avec les insecticides ou les fongicides à pulvériser, sauf si le fabricant mentionne que ces mélanges peuvent être faits.

Manganèse

Prévenir et suppléer les carences en manganèse

La carence en manganèse présente comme signe principal une chlorose internervaire des feuilles, qui commence sur les jeunes feuilles. Plus tard, toute la plante peut être touchée. Chez les céréales, la carence en manganèse se manifeste par un jaunissement général et un rabougrissement, parfois accompagnés de taches grises sur les feuilles. Le soja, les haricots secs comestibles et les céréales sont les cultures les plus susceptibles d'avoir une carence en manganèse.

Le manganèse est moins assimilable dans les sols à pH élevé. Il est donc important de ne pas ajouter plus de chaux que nécessaire pour corriger le degré

d'acidité du sol. La forme oxydée du manganèse est moins assimilable que sa forme réduite, ce qui explique pourquoi les signes apparaissent parfois dans des zones bien aérées et peu compactées. Pour plus de renseignements sur les produits et les doses à utiliser pour pallier une carence, se référer aux sections *Oligo-éléments* des chapitres consacrés aux différentes cultures. L'interprétation des résultats des analyses de sol pour le manganèse est présentée au tableau 9-7, *Interprétation des résultats sur le manganèse*.

Tableau 9-7 – Interprétation des résultats sur le manganèse

Teneur du sol en manganèse ¹	Mesures suggérées
Supérieure à 30	La biodisponibilité du manganèse est adéquate pour les grandes cultures.
16 à 30	La biodisponibilité du manganèse est adéquate pour de nombreuses cultures mais s'approche des niveaux de carence pour l'avoine, l'orge, le blé et le soya. Si des signes de carence apparaissent, il faut faire une pulvérisation de manganèse. On peut vérifier le tout au moyen d'une analyse des tissus végétaux.
Inférieure à 16	La biodisponibilité du manganèse est sans doute insuffisante pour l'avoine, l'orge, le blé et le soya. On doit faire une pulvérisation de manganèse au stade 4 feuilles des céréales, puis répéter l'opération trois semaines plus tard s'il y a lieu.

¹ Ces valeurs donnent un indice de la biodisponibilité du manganèse; elles sont fondées sur la quantité de manganèse extractible à l'aide d'acide phosphorique, et sur le pH du sol.

$\text{pH} \leq 7,1$: teneur du sol en manganèse = $498 + 0,248$ (manganèse extractible à l'aide d'acide phosphorique en mg/l) - $137 (\text{pH}) + 9,64 (\text{pH})^2$

$\text{pH} > 7,1$: teneur du sol en manganèse = $11,25 + 0,248$ (manganèse extractible à l'aide d'acide phosphorique en mg/l)

Zinc

Prévenir et suppléer les carences en zinc

En Ontario, le maïs est la culture qui présente le plus de carences en zinc. On a signalé aussi ce type de carence dans les cultures de haricots secs comestibles d'autres régions, mais elles ne se présentent qu'occasionnellement en Ontario. Ces carences ont tendance à apparaître dans des sols compactés, sableux et érodés qui ont un pH très élevé et une faible teneur en matière organique. Des signes peuvent également apparaître par temps frais et humide au début de la saison de croissance. Les carences en zinc se manifestent généralement sur les nouvelles pousses sous forme de zones vert pâle entre les nervures et de jaunissement sur le bout et le pourtour des feuilles. Une haute teneur en phosphore dans le sol

ou dans l'engrais, ou les deux, peut causer une carence en zinc ou l'aggraver. **Il faut épandre seulement la dose de phosphore recommandée.** L'épandage de fumier ou de biosolides peut prévenir ou amoindrir les carences en zinc. La maîtrise de l'érosion peut prévenir ce type de carence en limitant le déplacement de la couche arable.

On peut prévenir les carences en zinc en épandant un engrais de zinc à une dose de 4 kg/ha (3,6 lb/ac). On peut aussi en épandre à la volée (dose maximale de 14 kg/ha [12,5 lb/ac]), ce qui suppléera une carence pour trois ans, mais toute dose supérieure à 4 kg/ha (3,6 lb/ac) ne devrait pas être appliquée en bandes. Les pulvérisations foliaires permettent parfois de pallier une carence après l'apparition des signes pour autant qu'elles soient effectuées au début de la saison de croissance. L'interprétation des résultats des analyses de sol pour le zinc se trouve au tableau 9-8, *Interprétation des résultats sur le zinc*.

Tableau 9-8 – Interprétation des résultats sur le zinc

Teneur du sol en zinc ¹	Mesures suggérées
Supérieure à 200	Il y a lieu de soupçonner une contamination de l'échantillon ou du champ.
25 à 200	La biodisponibilité du zinc est adéquate pour la plupart des grandes cultures.
15 à 25	La biodisponibilité du zinc est adéquate pour la plupart des grandes cultures. Cependant, elle est à peine suffisante pour le maïs. Si le champ n'est pas uniforme en ce qui concerne sa texture, son pH ou sa vulnérabilité à l'érosion, il peut être bénéfique d'épandre du zinc dans certaines zones. Des signes de carence au stade 4 à 6 feuilles indiquent une carence certaine en zinc.
Inférieure à 15	Le sol ne renferme probablement pas assez de zinc pour le maïs et devrait en être enrichi au moyen d'un engrais.

¹ Ces valeurs donnent un indice de la biodisponibilité du zinc; elles sont fondées sur la quantité de zinc extractible à l'aide d'acide diéthylènetriaminepentaacétique et sur le pH du sol.

Teneur en zinc = $203 + 4,5$ (zinc extractible à l'aide d'acide diéthylènetriaminepentaacétique en mg/l) - $50,7 (\text{pH}) + 3,33 (\text{pH})^2$

Cuivre

On ne peut pas vraiment se fier aux analyses de sol pour déterminer la teneur en cuivre des terres de l'Ontario, mais il en est autrement avec les analyses des tissus végétaux, qui sont fort utiles. Le cuivre est rarement déficient dans les sols minéraux, excepté

peut-être lorsque la terre est très sableuse. Il peut toutefois être insuffisant dans les sols organiques (terre noire), et l'analyse des tissus végétaux est le meilleur moyen de déceler cette carence. Lorsque des sols organiques sont mis en culture pour la première fois, il est préférable d'amender la terre à une dose de 14 kg/ha (12,5 lb/ac) par an pour les trois premières années.

Bore

L'ajout de bore est nécessaire dans certains sols ensemencés de luzerne, surtout sur les terres sableuses ou graveleuses qui retiennent peu l'eau. Les carences sont plus répandues au centre de l'Ontario que dans le reste de la province. Elles se produisent le plus souvent par temps sec, et la réponse au traitement peut varier. Aucune analyse de sol fiable n'a été mise au point jusqu'à maintenant. Par contre, l'analyse des tissus végétaux permet de prévoir les besoins en bore, tout comme les signes observés sur les plantes. Pour connaître les doses nécessaires pour pallier une carence, se référer à la section *Oligo-éléments* du chapitre 3, *Cultures fourragères*.

Comme il ne faut qu'une quantité infime de bore et que les excès sont toxiques, on doit l'utiliser avec beaucoup de précautions. En Ontario, aucune carence en bore n'a été constatée pour les céréales, les pois et les haricots, et le bore appliqué sur ces cultures ou à d'autres cultures l'année précédente risque d'être toxique. **Il faut épandre le bore à la volée, et non en bandes au semis.**

Fer et molybdène

Aucune carence en fer ou en molybdène n'a été signalée dans les grandes cultures en Ontario.

Ajustement des directives relatives aux engrais

Les directives générales relatives aux engrais présentées dans ce guide s'appliquent dans les cas où aucune source organique d'éléments nutritifs n'a été épandue sur le champ. Si du fumier ou des biosolides ont été épandus, ou si des légumineuses sont enfouies, il faut réduire la fertilisation afin de compenser l'apport en éléments nutritifs sous forme organique.

Changements de culture ou de méthode culturale

Les besoins en engrais fondés sur l'analyse de sol du MAAARO sont adaptés à une culture donnée et à des méthodes culturales précises. Lorsqu'on incorpore des légumineuses ou qu'on épand du fumier, il faut parfois adapter ces directives en conséquence. Pour ajuster la quantité d'engrais, consulter le tableau 9-9, *Réduction des besoins en azote à la suite de l'enfouissement d'un engrais vert de légumineuses*. Si l'on utilise le champ en question pour une autre culture que celle pour laquelle les directives ont été émises, il faudra une nouvelle prescription d'engrais. En pareil cas, il faut se référer aux données du tableau correspondant du chapitre de la culture concernée dans la présente publication.

Ajustement des engrais après l'enfouissement de légumineuses

Lorsqu'ils sont enfouis, les résidus de légumineuses vivaces (p. ex. luzerne, lotier corniculé, trèfle) constituent une source appréciable d'azote pour la culture suivante. Le tableau 9-9, *Réduction des besoins en azote à la suite de l'enfouissement d'un engrais vert de légumineuses*, indique dans quelle mesure il faut réduire les quantités d'engrais azotés pour les cultures qui suivent une prairie de légumineuses.

On utilise de plus en plus tous les amendements organiques, et non seulement le lisier. Il peut s'agir de fumier, de matières de source non agricole comme des biosolides, du compost et du digestat, et de certains produits enregistrés auprès de l'Agence canadienne d'inspection des aliments qui contiennent des matières organiques (p. ex. biosolides traités).

Dans la présente publication, on peut interchanger les termes « fumier » et « autres amendements organiques » dans l'analyse de la biodisponibilité des éléments nutritifs et des risques.

Tableau 9-9 – Réduction des besoins en azote à la suite de l'enfouissement d'un engrais vert de légumineuses

Type de culture	Pour toutes les cultures, réduire le besoin en N de
Moins du tiers en légumineuses	0
Un tiers à un demi en légumineuses	55 kg/ha (49 lb/ac)
Plus de la moitié en légumineuses	110 kg/ha (100 lb/ac)
Légumineuses vivaces semées et enfouies la même année ¹	45 kg/ha (40 lb/ac)
Résidus de soya et de haricots de grande culture ²	0

¹ S'applique là où le peuplement est dense et les plantes atteignent plus de 40 cm (16 po) de hauteur.

² Pour toutes les cultures autres que le maïs. Pour ajuster les besoins en engrais pour le maïs, se référer à la *Feuille de calcul des doses d'azote pour le maïs* de l'annexe B.

Ajustement des engrais après l'épandage de fumier

Beaucoup d'exploitations agricoles de l'Ontario font de l'élevage, générant ainsi plus de 25 millions de tonnes de fumier par année. Pour maximiser les avantages économiques du fumier en nuisant le moins possible à l'environnement, le producteur doit savoir bien gérer les éléments nutritifs provenant de ce fertilisant.

Évaluation des éléments nutritifs biodisponibles à partir de valeurs moyennes

La meilleure façon de déterminer la concentration de chaque élément nutritif dans le fumier est d'en faire analyser un échantillon. Malheureusement, il n'est pas toujours possible de le faire, comme dans le cas d'une nouvelle exploitation. Les valeurs moyennes fournissent alors une estimation des éléments nutritifs biodisponibles pour la culture.

Le tableau 9-10, *Quantités habituelles d'azote, de phosphate et de potasse biodisponibles selon la source d'éléments nutritifs organiques*, présente une estimation des éléments nutritifs que contiennent divers types de fumier. Les valeurs indiquées se fondent sur les résultats moyens d'analyses de fumiers effectuées dans les laboratoires accrédités de l'Ontario. L'azote est indiqué sous sa forme biodisponible selon les pratiques d'épandage. Les quantités de phosphate et de potasse correspondent aux quantités d'éléments nutritifs assimilables qui peuvent remplacer les éléments apportés par des engrais. On peut utiliser ces valeurs comme point de départ pour calculer l'apport en éléments nutritifs provenant du fumier.

Tableau 9-10 – Quantités habituelles d'azote, de phosphate et de potasse biodisponibles selon la source d'éléments nutritifs organiques

Type	Sous-type	Matière sèche	Éléments nutritifs biodisponibles				Analyse en laboratoire			
			Azote ¹		P ₂ O ₅ ²	K ₂ O	% N	% NH ₄ -N	% P	% K
			Épandage à l'automne	Épandage au printemps						
Fumier solide										
Porcs	Composite	31 %	3,7 kg/t (7,4 lb/t. c.)	3,6 kg/t (7,1 lb/t. c.)	4,5 kg/t (9,0 lb/t. c.)	6,2 kg/t (12 lb/t. c.)	0,93	0,29	0,49	0,57
Bovins laitiers	Peu de litière	21 %	2,1 kg/t (4,1 lb/t. c.)	3,1 kg/t (6,1 lb/t. c.)	1,9 kg/t (3,7 lb/t. c.)	6,5 kg/t (13 lb/t. c.)	0,69	0,16	0,20	0,60
	Beaucoup de litière	41 %	2,5 kg/t (4,9 lb/t. c.)	1,3 kg/t (2,5 lb/t. c.)	2,0 kg/t (3,9 lb/t. c.)	7,2 kg/t (14 lb/t. c.)	0,82	0,11	0,21	0,66
Bovins de boucherie	Peu de litière	24 %	2,1 kg/t (4,2 lb/t. c.)	2,8 kg/t (5,5 lb/t. c.)	2,0 kg/t (4,0 lb/t. c.)	6,0 kg/t (12 lb/t. c.)	0,70	0,14	0,22	0,55
	Quantité moyenne de litière	35 %	3,1 kg/t (6,2 lb/t. c.)	4,2 kg/t (8,4 lb/t. c.)	3,4 kg/t (6,8 lb/t. c.)	8,0 kg/t (16 lb/t. c.)	1,03	0,20	0,37	0,74
	Beaucoup de litière	46 %	4,0 kg/t (8,0 lb/t. c.)	5,4 kg/t (10,7 lb/t. c.)	5,0 kg/t (9,9 lb/t. c.)	9,4 kg/t (19 lb/t. c.)	1,34	0,25	0,54	0,87
Moutons	Composite	32 %	2,6 kg/t (5,2 lb/t. c.)	2,8 kg/t (5,5 lb/t. c.)	3,2 kg/t (6,3 lb/t. c.)	8,2 kg/t (16 lb/t. c.)	0,87	0,28	0,34	0,76

Tableau 9-10 – Quantités habituelles d'azote, de phosphate et de potasse biodisponibles selon la source d'éléments nutritifs organiques

Type	Sous-type	Matière sèche	Éléments nutritifs biodisponibles				Analyse en laboratoire			
			Azote ¹		P ₂ O ₅ ²	K ₂ O	% N	% NH ₄ -N	% P	% K
			Épandage à l'automne	Épandage au printemps						
Chèvres laitières	Composite	36 %	3,1 kg/t (6,2 lb/t. c.)	3,6 kg/t (7,8 lb/t. c.)	2,6 kg/t (5,2 lb/t. c.)	11,1 kg/t (22 lb/t. c.)	1,04	0,28	0,28	1,03
Compost	Composté	46 %	3,4 kg/t (6,7 lb/t. c.)	1,0 kg/t (1,9 lb/t. c.)	2,4 kg/t (4,8 lb/t. c.)	4,9 kg/t (9,7 lb/t. c.)	0,84	0,00	0,26	0,45
	Non composté	47 %	5,4 kg/t (11 lb/t. c.)	5,2 kg/t (10 lb/t. c.)	3,8 kg/t (7,5 lb/t. c.)	11,4 kg/t (23 lb/t. c.)	1,32	0,12	0,41	1,05
Veaux (de grain)	Composite	31 %	2,4 kg/t (4,7 lb/t. c.)	2,6 kg/t (5,2 lb/t. c.)	1,8 kg/t (3,5 lb/t. c.)	6,5 kg/t (11 lb/t. c.)	0,79	0,14	0,19	0,51
Chevaux	Composite	37 %	1,5 kg/t (3,0 lb/t. c.)	-1,3 kg/t (-2,5 lb/t. c.)	1,4 kg/t (2,8 lb/t. c.)	4,7 kg/t (9,3 lb/t. c.)	0,50	0,07	0,15	0,43
Visons	Composite	46 %	16,4 kg/t (33 lb/t. c.)	21,8 kg/t (44 lb/t. c.)	16,8 kg/t (33 lb/t. c.)	8,6 kg/t (17 lb/t. c.)	3,28	1,42	1,82	0,79
Poulets	Pondeuses	37 %	10,4 kg/t (21 lb/t. c.)	12,6 kg/t (25 lb/t. c.)	9,2 kg/t (18 lb/t. c.)	10,6 kg/t (21 lb/t. c.)	2,07	0,81	1,00	0,98
	Poulettes	43 %	16,0 kg/t (32 lb/t. c.)	23,2 kg/t (46 lb/t. c.)	12,7 kg/t (25 lb/t. c.)	15,0 kg/t (30 lb/t. c.)	3,19	0,70	1,38	1,39
	Poulets à griller	66 %	15,6 kg/t (31 lb/t. c.)	18,8 kg/t (38 lb/t. c.)	13,0 kg/t (26 lb/t. c.)	19,4 kg/t (39 lb/t. c.)	3,12	0,66	1,41	1,79
	Reproducteurs de relève pour la production de poulets à griller	63 %	9,4 kg/t (19 lb/t. c.)	7,9 kg/t (16 lb/t. c.)	13,1 kg/t (26 lb/t. c.)	14,0 kg/t (28 lb/t. c.)	1,88	0,29	1,42	1,29
	Pondeuses de relève pour la production de poulets à griller	65 %	11,1 kg/t (22 lb/t. c.)	10,7 kg/t (21 lb/t. c.)	14,6 kg/t (29 lb/t. c.)	16,9 kg/t (34 lb/t. c.)	2,21	0,32	1,58	1,56
Dindes	Dindons mâles	52 %	13,1 kg/t (26 lb/t. c.)	15,5 kg/t (31 lb/t. c.)	12,7 kg/t (25 lb/t. c.)	17,4 kg/t (34 lb/t. c.)	2,62	0,87	1,38	1,59
	Dindonneaux	71 %	16,6 kg/t (33 lb/t. c.)	20,0 kg/t (40 lb/t. c.)	8,3 kg/t (17 lb/t. c.)	13,2 kg/t (26 lb/t. c.)	3,31	0,66	0,90	1,22
	Reproducteurs	55 %	10,8 kg/t (22 lb/t. c.)	10,6 kg/t (21 lb/t. c.)	12,0 kg/t (24 lb/t. c.)	14,6 kg/t (29 lb/t. c.)	2,16	0,86	1,30	1,35
	Dindes à griller	62 %	16,8 kg/t (33 lb/t. c.)	22,0 kg/t (44 lb/t. c.)	11,2 kg/t (22 lb/t. c.)	15,4 kg/t (31 lb/t. c.)	3,35	0,60	1,21	1,42
Biosolides	Composite	32 %	15,1 kg/t (30 lb/t. c.)	30,8 kg/t (61 lb/t. c.)	12,1 kg/t (24 lb/t. c.)	1,2 kg/t (2,4 lb/t. c.)	3,76	0,64	1,31	0,11
Fumier liquide										
Porcs	Truies (sevrage précoce avec ségrégation)	1,7 %	0,8 kg/m ³ (8,4 lb/ 1 000 gal)	1,6 kg/m ³ (16 lb/ 1 000 gal)	0,6 kg/m ³ (5,5 lb/ 1 000 gal)	1,2 kg/m ³ (12 lb/ 1 000 gal)	0,24	0,18	0,06	0,11
	Porcelets sevrés	2,3 %	1,0 kg/m ³ (9,8 lb/ 1 000 gal)	1,9 kg/m ³ (19 lb/ 1 000 gal)	0,8 kg/m ³ (8,3 lb/ 1 000 gal)	1,6 kg/m ³ (16 lb/ 1 000 gal)	0,28	0,19	0,09	0,15
	Porcs de finition	4,9 %	1,8 kg/m ³ (18 lb/ 1 000 gal)	3,3 kg/m ³ (33 lb/ 1 000 gal)	1,4 kg/m ³ (14 lb/ 1 000 gal)	2,9 kg/m ³ (29 lb/ 1 000 gal)	0,52	0,36	0,15	0,27
	Porcs (de la mise bas à la finition)	3,8 %	1,5 kg/m ³ (15 lb /1 000 gal)	2,8 kg/m ³ (28 lb /1 000 gal)	0,9 kg/m ³ (9,2 lb/ 1 000 gal)	2,3 kg/m ³ (23 lb/ 1 000 gal)	0,43	0,29	0,10	0,21

Tableau 9-10 – Quantités habituelles d'azote, de phosphate et de potasse biodisponibles selon la source d'éléments nutritifs organiques

Type	Sous-type	Matière sèche	Éléments nutritifs biodisponibles				Analyse en laboratoire			
			Azote ¹		P ₂ O ₅ ²	K ₂ O	% N	% NH ₄ -N	% P	% K
			Épandage à l'automne	Épandage au printemps						
Bovins laitiers	Composite	8,6 %	1,2 kg/m ³ (12 lb/ 1 000 gal)	1,8 kg/m ³ (18 lb/ 1 000 gal)	0,8 kg/m ³ (8,3 lb/ 1 000 gal)	2,7 kg/m ³ (27 lb/ 1 000 gal)	0,39	0,16	0,09	0,25
	Épais	14,1 %	1,6 kg/m ³ (16 lb/ 1 000 gal)	2,1 kg/m ³ (21 lb/ 1 000 gal)	1,3 kg/m ³ (13 lb/ 1 000 gal)	3,4 kg/m ³ (33 lb/ 1 000 gal)	0,53	0,18	0,14	0,31
	Fluide	4,4 %	0,8 kg/m ³ (7,5 lb/ 1 000 gal)	1,3 kg/m ³ (13 lb/ 1 000 gal)	0,4 kg/m ³ (3,7 lb/ 1 000 gal)	2,1 kg/m ³ (20 lb/ 1 000 gal)	0,25	0,12	0,04	0,19
	Dilué	1,1 %	0,4 kg/m ³ (3,6 lb/ 1 000 gal)	0,8 kg/m ³ (8,4 lb/ 1 000 gal)	0,2 kg/m ³ (1,8 lb/ 1 000 gal)	1,2 kg/m ³ (12 lb/ 1 000 gal)	0,12	0,06	0,02	0,11
Bovins de boucherie	Composite	8,6 %	1,1 kg/m ³ (11 lb/ 1 000 gal)	1,6 kg/m ³ (16 lb/ 1 000 gal)	0,7 kg/m ³ (7,4 lb/ 1 000 gal)	2,5 kg/m ³ (25 lb/ 1 000 gal)	0,37	0,15	0,08	0,23
Ruissellement	Composite	0,7 %	0,15 kg/m ³ (1,5 lb/ 1 000 gal)	0,3 kg/m ³ (2,9 lb/ 1 000 gal)	0,1 kg/m ³ (0,9 lb/ 1 000 gal)	1,0 kg/m ³ (9,7 lb/ 1 000 gal)	0,05	0,03	0,01	0,09
Visons	Composite	3,6 %	1,6 kg/m ³ (16 lb/ 1 000 gal)	3,1 kg/m ³ (31 lb/ 1 000 gal)	0,9 kg/m ³ (9,2 lb/ 1 000 gal)	1,0 kg/m ³ (9,7 lb/ 1 000 gal)	0,45	0,26	0,10	0,09
Veaux (de lait)	Composite	1,5 %	0,2 kg/m ³ (2,4 lb/ 1 000 gal)	0,4 kg/m ³ (3,7 lb/ 1 000 gal)	0,2 kg/m ³ (1,8 lb/ 1 000 gal)	1,9 kg/m ³ (19 lb/ 1 000 gal)	0,08	0,05	0,02	0,18
Poulets	Pondeuses	9,9 %	2,8 kg/m ³ (28 lb/ 1 000 gal)	4,8 kg/m ³ (48 lb/ 1 000 gal)	2,5 kg/m ³ (25 lb/ 1 000 gal)	3,1 kg/m ³ (31 lb/ 1 000 gal)	0,81	0,56	0,27	0,29
	Poulettes	15,3 %	3,6 kg/m ³ (36 lb/ 1 000 gal)	5,9 kg/m ³ (58 lb/ 1 000 gal)	3,7 kg/m ³ (37 lb/ 1 000 gal)	3,7 kg/m ³ (38 lb/ 1 000 gal)	1,04	0,62	0,40	0,34
Biosolides	Digestion aérobie	2,0 %	0,4 kg/m ³ (4,2 lb/ 1 000 gal)	0,8 kg/m ³ (7,8 lb/ 1 000 gal)	0,6 kg/m ³ (5,5 lb/ 1 000 gal)	0,0	0,12	0,01	0,06	0,00
	Digestion anaérobie	4,4 %	1,0 kg/m ³ (9,8 lb/ 1 000 gal)	1,7 kg/m ³ (17 lb/ 1 000 gal)	1,3 kg/m ³ (13 lb/ 1 000 gal)	0,0	0,28	0,08	0,14	0,00

¹ Azote biodisponible = quantité d'azote biodisponible, en présumant que la matière est incorporée dans un délai de 24 heures.

² Le P₂O₅ biodisponible compte pour la moitié de l'apport de phosphore assimilable peu après l'épandage. Le reste du P₂O₅ devient disponible l'année suivante.

La quantité réelle immédiatement disponible pour la production culturale sera moindre si la culture n'a pas besoin de tous les éléments nutritifs épandus.

La quantité d'oligo-éléments et de matière organique n'est pas prise en compte dans ce tableau.

La biodisponibilité de l'azote du fumier dépend des proportions d'azote ammoniacal et d'azote organique qui s'y trouvent, ainsi que de la période de l'année où l'épandage et l'incorporation sont effectués. L'azote ammoniacal du fumier, qui est immédiatement assimilable par la culture, a la même composition chimique que l'azote que l'on trouve dans bon nombre d'engrais minéraux. Malheureusement, l'azote ammoniacal est également susceptible de se volatiliser si

le fumier n'est pas incorporé immédiatement. Le reste de l'azote du fumier est présent sous forme organique et devient graduellement assimilable par la culture à mesure que les composés organiques se décomposent.

On peut estimer plus précisément les éléments nutritifs biodisponibles en tenant compte du moment et des conditions de l'épandage, ainsi que du délai avant l'incorporation. Voir à ce sujet la feuille de travail du

MAAARO *Calcul des éléments nutritifs assimilables à partir de l'analyse du fumier épandu au printemps.* Le logiciel NMAN du ministère peut aussi être utile. La version NMAN 3 peut être téléchargée à l'adresse ontario.ca/omafra.

Gestion des fumiers

Valeur du fumier

On sous-estime souvent la valeur du fumier pour les cultures. Il renferme tous les éléments nutritifs dont les végétaux ont besoin, mais pas nécessairement dans les proportions convenant aux sols et aux cultures. Le fumier contient de l'azote, du phosphore, du potassium, de nombreux éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments, ainsi que de la matière organique qui contribue à former et à maintenir la structure du sol.

Plans de gestion des éléments nutritifs

Le plan de gestion des éléments nutritifs permet de faire correspondre les besoins de la culture avec les éléments nutritifs présents dans le sol et ceux qui proviennent du fumier, des cultures couvre-sol et des engrais commerciaux. On détermine les doses de fumier et d'engrais commercial requises à partir de l'analyse de la teneur du fumier en éléments nutritifs, des résultats des analyses de sol et des besoins de la culture.

Le plan de gestion des éléments nutritifs peut prévoir des doses de fumier ou d'engrais moindres si l'épandage comporte certains risques, comme il est indiqué ci-dessous :

Critère	Risque
Azote	Lessivage des nitrates dans les eaux souterraines
Phosphore	Déplacement des phosphates vers les eaux de surface
Volume de liquide	Ruissellement direct, renfermant de l'ammoniac, des phosphates et des agents pathogènes

Exemple

Un producteur épand au printemps 45 m³ (45 000 litres) par hectare (4 000 gallons par acre) de fumier liquide provenant de porcs de finition, et enfouit le fumier dans le sol dans les 24 heures suivantes.

Équivalent en engrais	Prix par kg ¹	Valeur par hectare
Azote	153 kg/ha x 1,30	= 199 \$
P ₂ O ₅	126 kg/ha x 1,45	= 183 \$
K ₂ O	96 kg/ha x 0,97	= 93 \$
Valeur par hectare		= 475 \$
Valeur par acre		= 215 \$

On peut calculer l'équivalent en engrais commerciaux à l'aide du tableau 9-10, *Quantités habituelles d'azote, de phosphate et de potasse biodisponibles selon la source d'éléments nutritifs organiques*. Selon les prix suggérés des engrais commerciaux figurant dans ce tableau, la valeur approximative du fumier est de 475 \$/ha (215 \$/ac) si l'on présume que la culture a besoin de tous les éléments nutritifs présents.

¹Prix moyen des engrais commerciaux en 2016.

Biodisponibilité de l'azote provenant du fumier

La quantité d'azote biodisponible du fumier dépend de la composition de ce dernier, du moment de l'épandage et du délai d'incorporation dans le sol. Les caractéristiques pertinentes sont la teneur en azote total, la proportion d'azote sous forme minérale (ammoniacale) et organique, ainsi que le degré de décomposition de la matière organique qui libère l'azote sous une forme minérale.

Beaucoup de facteurs influencent la quantité d'azote biodisponible pour une future culture provenant de l'épandage de fumier. En voici quelques-uns :

- Type de fumier;
- Quantité et type de litière;
- Délai entre l'épandage et l'incorporation;
- Culture plantée par la suite;
- Sol et conditions météorologiques propres au site.

Selon un examen récent des données sur la réaction des cultures à l'azote du fumier, il y aurait plusieurs moyens d'améliorer l'absorption de l'azote provenant de ce fertilisant. Plus précisément, la biodisponibilité estimée de l'azote du fumier de ruminants (p. ex. fumier de bovins avec litière) est plus élevée quand l'épandage se fait à l'automne, et moindre lorsqu'il est effectué au printemps, en présemis. L'apport en azote de fumier de porcs et de volailles est demeuré relativement le même par rapport aux anciennes estimations.

Azote minéral provenant du fumier

Le fumier de divers types d'élevages comporte des proportions variables d'azote organique et ammoniacal. Le fumier liquide contient par exemple plus d'azote ammoniacal que le fumier solide. On peut déterminer les proportions respectives d'azote ammoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) et d'azote organique au moyen d'une analyse du fumier, ou par approximation à partir des valeurs fournies au tableau 9-11, *Proportions approximatives d'azote ammoniacal par rapport à l'azote total par type de fumier*.

L'azote ammoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) est directement assimilable par les cultures en croissance, tout comme l'azote que contiennent les engrais minéraux, mais il est également susceptible de se volatiliser. La volatilisation se poursuit jusqu'à ce que le fumier passe dans le sol, soit par incorporation ou à cause de la pluie. Quand il est incorporé rapidement, le fumier fournit davantage d'azote à la culture. Le taux de volatilisation de $\text{NH}_4\text{-N}$ dépend du degré d'humidité du sol et des conditions météorologiques au moment de l'épandage. L'azote ammoniacal est davantage absorbé par l'eau du sol lorsque ce dernier est humide, tandis que les températures chaudes augmentent les pertes par volatilisation. Les pertes sont plus élevées les jours chauds et ensoleillés quand les sols sont secs, et plus faibles par temps couvert et froid ($< 10\text{ °C}$), lorsque les sols sont humides ou durant les périodes de pluie. L'azote ammoniacal résiduel dans le sol est assimilable par la culture. Une estimation de la quantité d'azote ammoniacal préservé dans certaines conditions figure au tableau 9-12, *Estimation de la proportion (facteur) d'azote ammoniacal du fumier qui est préservée pendant l'année d'épandage*. Ces valeurs moyennes, présentées à des fins de planification, tiennent aussi compte de l'incidence de la température.

Tableau 9-11 – Proportions approximatives d'azote ammoniacal par rapport à l'azote total par type de fumier

Type	Source	Azote ammoniacal ²
Fumier liquide ¹	Fumier liquide – porcs	66 %
	Fumier liquide – bovins laitiers	42 %
	Fumier liquide – bovins de boucherie	43 %
	Fumier liquide – volailles	67 %
Fumier solide ²	Fumier solide – porcs	26 %
	Fumier solide – bovins laitiers	21 %
	Fumier solide – bovins de boucherie (litière abondante)	12 %
	Fumier solide – chevaux	15 %
	Fumier solide – volailles (poulets à griller)	6 %
	Fumier solide – volailles (pondeuses)	46 %
	Fumier composté – bovins	0,6 %
Sources municipales	Biosolides d'épuration (digestion aérobie)	1,6 %
	Biosolides d'épuration (digestion anaérobie)	35 %
	Biosolides d'épuration déshydratés	12 %
	Biosolides d'épuration stabilisés à la chaux	Trace
	Biosolides d'usine de papier	Trace
	Compost de résidus de champignons	5 %

¹ Plus l'humidité est élevée (ou que la matière sèche diminue), plus le contenu en azote ammoniacal augmente.

² Le reste de l'azote est sous forme organique.

Lorsque le fumier est épandu à la fin de l'automne ($< 10\text{ °C}$), les pertes sont plus faibles puisque les températures fraîches diminuent l'activité microbienne du sol, ce qui réduit la conversion. Il peut y avoir de grandes pertes à cause du ruissellement des applications de fin d'automne, surtout si le fumier n'est pas incorporé. La section *Atténuation des risques liés à l'azote* traite des pertes d'azote par lessivage et dénitrification.

Tableau 9-12 – Estimation de la proportion (facteur) d'azote ammoniacal du fumier qui est préservée pendant l'année d'épandage

Renseignements sur l'incorporation	Injecté (couvert)	Incorporé					Non incorporé		
		1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	Sol dénudé	Résidus	Culture sur pied (sous le couvert végétal)
Moyenne (facteur)	1,00	0,75	0,60	0,50	0,45	0,40	0,35	0,50	0,66
Frais (< 10 °C) ¹	1,00	0,85	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,66	0,75
Chaud (> 25 °C) ¹	1,00	0,65	0,50	0,40	0,35	0,30	0,20	0,35	0,55

Adaptation (par K. Reid) d'un document de J. Lauzon et K. Janovicek, Université de Guelph, 2013. Le tableau se fonde sur une évaluation des données de 180 champs, dont 165 de maïs, portant sur le rendement des cultures après l'épandage de fumier.

¹ Les données montrent que l'azote ammoniacal a tendance à se volatiliser quand les températures sont inférieures ou supérieures à la moyenne. D'autres facteurs, comme l'humidité du sol et la quantité de couvre-sol, ont aussi une incidence sur la préservation de l'azote ammoniacal.

Azote organique provenant du fumier

L'azote organique n'est assimilable par la culture qu'après avoir été minéralisé sous forme ammoniacale par l'activité microbienne. L'ampleur de la minéralisation dépend du type de fumier, puisque dans certains cas, la matière organique qu'il contient se décompose moins bien. En général, l'azote organique devient plus rapidement biodisponible s'il provient de fumier d'animaux nourris avec des concentrés plutôt que des fourrages.

La minéralisation cesse presque complètement lorsque les températures du sol se rapprochent du point de congélation et s'accélère par temps chaud et en présence d'un bon taux d'humidité, c'est-à-dire à des conditions qui favorisent la croissance microbienne. L'azote de fumier solide épandu juste avant les semis pourrait ne pas être assimilable à temps pour répondre aux besoins de la culture. La flore microbienne du sol joue un rôle important dans la minéralisation de l'azote organique. Le ratio carbone-azote peut aider à prévoir la quantité d'azote qui sera libérée pour une culture : du fumier solide de bovins ayant une forte teneur en carbone (litière de copeaux de bois) et une faible teneur en azote (fourrages de faible qualité) présentera un ratio carbone-azote élevé (p. ex. 50:1). Du fumier solide de volailles ayant une diète riche en protéines qui contient de la litière de paille aura quant à lui un faible ratio carbone-azote (p. ex. 9:1)

Pour calculer la quantité d'azote organique biodisponible, il faut tenir compte des résultats de l'analyse des éléments nutritifs du fumier, du carbone organique et du ratio carbone-azote. Voir la formule présentée plus loin dans cette section, Pourcentage estimatif des pertes d'azote organique biodisponible pendant l'année de l'application, qui sert à évaluer la quantité d'azote organique du fumier qui sera

assimilable par la culture. On peut estimer cette biodisponibilité en déterminant la quantité d'azote dont les organismes présents dans le sol auront besoin pour minéraliser l'azote que contient le fumier. Si la quantité d'azote dans le fumier excède les besoins de ces organismes, l'excédent est alors relâché dans le sol. Inversement, si la quantité d'azote dans la matière organique est inférieure aux besoins des organismes, la portion supplémentaire d'azote requise est tirée (empruntée) du sol, ce qui réduit la quantité d'azote biodisponible pour la culture.

À la lumière d'une évaluation des données de 180 études de terrain portant sur le rendement des cultures après l'épandage de fumier menée par J. Lauzon et K. Janovicek (Université de Guelph) en 2013, une estimation de la quantité d'azote organique biodisponible provenant du fumier épandu au printemps a été ajoutée à la formule présentée plus bas. Dans cette dernière, on présume qu'en moyenne 42 % du carbone provient de la matière sèche du fumier, qu'on préserve 37,4 % du carbone pour le fumier liquide et 31 % pour le fumier solide, et que le ratio carbone-azote de la biologie du sol est de 8:1.

Formule (voir version longue plus bas) : Azote organique biodisponible du fumier = azote organique x (carbone dans le fumier x carbone absorbé par les organismes présents dans le sol x ratio carbone-azote de la biologie du sol) x facteur de conversion (% de lb par t. c. ou par 1 000 gallons).

Le $\text{NH}_4\text{-N}$, qu'il soit appliqué directement ou provienne de la minéralisation de l'azote organique, est converti en azote des nitrates par l'activité microbienne dans le sol. Contrairement au $\text{NH}_4\text{-N}$ qui se lie aux particules du sol, l'ion nitrate peut circuler librement avec l'eau du sol.

De l'azote des nitrates ($\text{NO}_3\text{-N}$) se perd par lessivage ou dénitrification du sol si le fumier (surtout le fumier liquide, qui est riche en $\text{NH}_4\text{-N}$) est épandu en été ou au début de l'automne sur un sol dénudé. La quantité perdue dépend de la quantité de $\text{NO}_3\text{-N}$ produite, qui elle dépend du temps requis pour la conversion du $\text{NH}_4\text{-N}$ et l'azote organique en $\text{NO}_3\text{-N}$. Les épandages de fumier faits à la fin de l'été risquent davantage d'occasionner des pertes de $\text{NO}_3\text{-N}$ que ceux effectués juste avant le gel ou au printemps.

Les cultures couvre-sol peuvent contribuer à retenir l'azote du fumier épandu l'été ou au début de l'automne. Les cultures qui captent l'azote, comme les brassicacées (radis), les céréales (avoine) et les légumineuses (trèfle rouge), le conservent dans leurs racines et leur biomasse. Consulter à ce sujet la section *Cultures couvre-sol* au chapitre 8, *Gestion assurant la santé du sol*.

Le tableau 9-13, *Estimation de l'azote biodisponible provenant de fumier épandu à la fin de l'été et à l'automne, sous forme de proportion (facteur) de l'azote total épandu*, présente les résultats d'essais au champ avec certains types de fumier, qui visaient à établir la

quantité d'azote biodisponible l'année suivante. Pour évaluer la quantité d'azote assimilable par la culture, il faut multiplier la quantité d'azote présente dans le fumier (selon l'analyse) épandu au champ par le facteur de biodisponibilité (tableau 9-13) selon le type de fumier et le moment de l'épandage.

Exemple : 45 000 l/ha (4 000 gal/ac) de fumier liquide de porcs de finition sont épandus au début de l'automne sur un sol dénudé (l'analyse montre que le fumier contient 0,52 % d'azote au total, ce qui correspond à 5,2 kg/m³ ou 52 lb/1 000 gal d'azote au total). Vu les pertes causées par un épandage au début de l'automne, l'apport total en azote du fumier est de 82 kg/ha (73 lb/ac). [45 l/ha x 5,2 kg/l x 0,35 = 82 kg/ha]

Le tableau 9-13 tient compte de la volatilisation de l'azote ammoniacal, de la minéralisation de l'azote organique et de la perte des nitrates par dénitrification ou lessivage. Une grande partie de l'azote ammoniacal se volatilise quand on laisse le fumier à la surface du sol, sans l'incorporer; la proportion d'azote assimilable par la culture est donc plus élevée si le fumier est incorporé.

Formule : Pourcentage estimatif des pertes d'azote organique biodisponible pendant l'année de l'application (épandage au printemps)

% d'azote organique = % de l'azote total - % de $\text{NH}_4\text{-N}$

Fumier liquide (épandu)

[% d'azote organique - (% de matière sèche ÷ 50,93)]

x 100 = lb/1 000 gal

x 10 = kg/1 000 l ou kg/m³

Exemple : fumier liquide de bovins laitiers
(4,5 % de matière sèche, 0,25 % de l'azote total; 0,12 % de $\text{NH}_4\text{-N}$; 0,04 % de phosphore; 0,19 % de potassium)

Azote organique biodisponible

= [(0,25 - 0,12) - (4,5 ÷ 50,93)]

= (0,13 - 0,09)

= 0,04 %

0,04 % x 100 = 4 lb/1 000 gal

0,04 % x 10 = 0,4 kg/m³

Fumier solide (épandu)

[% d'azote organique - (% de matière sèche ÷ 61,44)]

x 20 = lb/t. c.

x 10 = kg/t

Exemple : fumier solide de poulets à griller
(70 % de matière sèche, 3,12 % de l'azote total; 0,6 % de $\text{NH}_4\text{-N}$; 1,4 % de phosphore; 1,8 % de potassium)

Azote organique biodisponible

= [(3,12 - 0,6) - (70 ÷ 61,44)]

= (2,52 - 1,14)

= 1,38 %

1,38 % x 20 = 27,6 lb/t. c.

1,38 % x 10 = 13,8 kg/t

Analyse du fumier

Il est nécessaire de faire analyser le fumier étant donné que sa teneur en éléments nutritifs, particulièrement les concentrations de phosphore et de potasse, varie d'une exploitation à l'autre. Le type d'élevage, l'alimentation, la litière, les liquides qui s'ajoutent au fumier et le mode de stockage de ce dernier sont autant de facteurs qui influent au bout du compte sur les concentrations d'éléments nutritifs. Les teneurs en phosphore sont généralement plus élevées dans les fumiers solides, alors que celles du potassium le sont

dans la portion liquide; le degré d'agitation aura donc un effet sur les quantités d'éléments nutritifs épandues. Les modifications apportées aux doses d'engrais en fonction de l'analyse des fumiers seront plus précises que celles qui se basent sur des valeurs moyennes, mais il est possible d'ajuster ces valeurs pour de futurs épandages d'engrais lorsque les résultats de l'analyse sont disponibles après l'épandage. Le tableau 9-14, *Interprétation des résultats d'analyses de fumier*, présente brièvement la signification des résultats de l'analyse, la biodisponibilité potentielle et les risques éventuels (p. ex. sels totaux).

Tableau 9-13 – Estimation de l'azote biodisponible provenant de fumier épandu à la fin de l'été et à l'automne, sous forme de proportion (facteur) de l'azote total épandu

Azote biodisponible du fumier = azote total (selon l'analyse) x azote biodisponible (facteur du tableau)

On présume qu'il s'agit d'une culture semée au printemps qui poussera pendant toute la saison (p. ex. maïs).

Les données tiennent compte des pertes d'ammoniac par volatilisation et de la minéralisation de l'azote organique.

Type de fumier	Moment de l'épandage	Incorporé (< 24 heures)			Non incorporé ¹	
		Fin de l'été	Début de l'automne	Fin de l'automne	Début de l'automne	Fin de l'automne
Fumier solide	Fumier solide – bovins/moutons/chevaux	0,20	0,30	0,35	0,30	0,35
	Fumier solide – porcs/compost ¹	0,30	0,40	0,45	0,40	0,45
	Fumier solide – volailles/visons	0,40	0,50	0,60	0,50	0,60
Fumier liquide	Fumier liquide – bovins	0,30	0,30	0,35	0,30	0,35
	Fumier liquide – porcs	0,25	0,35	0,45	0,35	0,45
	Fumier liquide – volailles/visons ¹	0,25	0,35	0,50	0,35	0,50
	Biosolides sous forme liquide	0,25	0,35	0,45	0,35	0,45

¹ Ces coefficients se fondent sur la biodisponibilité présumée de l'azote selon les caractéristiques de chaque type de fumier, car il n'existe pas de mesures directes de cette biodisponibilité.

Adaptation (par K. Reid) d'un document de J. Lauzon et K. Janovicek, Université de Guelph, 2013. Le tableau se fonde sur une évaluation des données de 180 champs, dont 165 de maïs, portant sur le rendement des cultures après l'épandage de fumier.

Tableau 9-14 – Interprétation des résultats d'analyses de fumier

Le calcul des éléments nutritifs peut se faire à partir d'une analyse dans le logiciel NMAN 3, disponible à l'adresse ontario.ca/omafra, ou au moyen de la feuille de calcul électronique se trouvant au www.gocorn.net.

LÉGENDE : – = aucune donnée disponible

Composantes	Exemple de fumiers liquide et solide		Estimation des éléments nutritifs biodisponibles – Fumier solide (fumier liquide)	Commentaires
	Exemple d'analyse			
	Fumier solide	Fumier liquide		
Matière sèche	41 %	8,6 %	410 kg/t (86 kg/m ³)	La matière sèche peut s'ajouter au volume de matières solides épandues provenant du fumier.
Azote total	0,82 %	0,38 %	Azote organique biodisponible + NH ₄ -N biodisponible = Azote total biodisponible	Azote total – NH ₄ -N = azote organique De l'azote organique est relâché lentement grâce à l'activité microbienne à un taux variant de 5 à 30 %, selon : • le moment de l'épandage; • le ratio carbone-azote; • l'état du sol et les conditions météorologiques.

Suite à la page suivante

Suite de la page précédente

Tableau 9-14 – Interprétation des résultats d'analyses de fumier

Le calcul des éléments nutritifs peut se faire à partir d'une analyse dans le logiciel NMAN 3, disponible à l'adresse ontario.ca/omafra, ou au moyen de la feuille de calcul électronique se trouvant au www.gocorn.net.

LÉGENDE : – = aucune donnée disponible

Composantes	Exemple de fumiers liquide et solide		Estimation des éléments nutritifs biodisponibles – Fumier solide (fumier liquide)	Commentaires
	Exemple d'analyse			
	Fumier solide	Fumier liquide		
NH ₄ -N (azote ammoniacal)	1 100 ppm	1 600 ppm	2,6 kg/t (1,8 kg/m ³)	Le NH ₄ -N est biodisponible, mais se perd facilement par volatilisation. En incorporant le fumier le jour même, on conserve environ 75 % du NH ₄ -N.
Phosphore (P)	0,21 %	0,09 %	3,7 kg/t (1,7 kg/m ³) de P ₂ O ₅	On présume que la biodisponibilité du phosphore du fumier correspond à environ 80 % de celle de source commerciale au fil du temps; les 20 % restant se lient fortement au sol ou se perdent par ruissellement ou érosion. Pourcentage total de phosphore x 1,84 x 100 = lb/1 000 gal de P ₂ O ₅ biodisponible (à long terme) Pourcentage total de phosphore x 1,84 x 20 = lb/t. c. de P ₂ O ₅ biodisponible Quand le sol est peu fertile, le phosphore pourrait ne pas être entièrement biodisponible immédiatement après l'épandage, et il faudra peut-être épandre plus de P ₂ O ₅ (de source commerciale).
Potassium (K)	0,66 %	0,10 %	7,1 kg/t (1,1 kg/m ³) de K ₂ O	On présume que la biodisponibilité du potassium du fumier équivaut à environ 90 % de celle de source commerciale au fil du temps. Pourcentage total de potassium x 1,08 x 100 = lb/1 000 gal de K ₂ O biodisponible Pourcentage total de potassium x 1,08 x 20 = lb/t. c. de K ₂ O biodisponible
Matière organique	42 %	18,5 %	463 kg/t (185 kg/m ³)	La matière organique biodisponible est indiquée sous forme de matière sèche épandue. La teneur actuelle du sol en matière organique aura une incidence sur l'absorption, le recyclage et la perte des éléments nutritifs ainsi que la capacité à retenir l'eau. Lorsqu'on épand régulièrement du fumier, le sol contient habituellement plus de matière organique.
Ratio carbone-azote	25:1	11:1	–	Le ratio carbone-azote indique à quelle vitesse le carbone peut se décomposer. L'azote sert de nourriture aux micro-organismes qui décomposent le carbone. Un ratio carbone-azote d'environ 10:1 est semblable à celui du sol. Si le ratio carbone-azote dépasse 25:1 (c.-à-d. fumier contenant beaucoup de litière), l'azote du sol pourrait se lier au carbone décomposé, ce qui causerait une carence en azote.
Carbone	–	–	~ 178 kg/t (~ 24 kg/m ³)	On peut estimer grossièrement la teneur en carbone en multipliant l'azote organique par la valeur du carbone dans le ratio carbone-azote. Il est également possible de demander à un laboratoire d'évaluer la teneur en carbone organique.

Suite à la page suivante

Suite de la page précédente

Tableau 9-14 – Interprétation des résultats d'analyses de fumier

Le calcul des éléments nutritifs peut se faire à partir d'une analyse dans le logiciel NMAN 3, disponible à l'adresse ontario.ca/omafra, ou au moyen de la feuille de calcul électronique se trouvant au www.gocorn.net.

LÉGENDE : – = aucune donnée disponible

Composantes	Exemple de fumiers liquide et solide			Commentaires
	Exemple d'analyse		Estimation des éléments nutritifs biodisponibles – Fumier solide (fumier liquide)	
	Fumier solide	Fumier liquide		
pH	8,0	7,0	–	L'azote ammoniacal se volatilise parce que le $\text{NH}_4\text{-N}$ du fumier ou de la solution se transforme en NH_3 (gaz dissous). Plus le pH ou la température monte, plus il y a volatilisation. Certains digestats et biosolides traités, qui ont un pH élevé et une grande teneur en azote ammoniacal, sont sujets à une grande perte d'azote par volatilisation lorsqu'ils ne sont pas incorporés sans délai.
Densité apparente du sol	455 kg/m ³ (28,4 lb/pi ³)	1 062 kg/m ³ (66,3 lb/pi ³)	–	La densité apparente du sol est un point important à considérer dans la planification du transport et de l'épandage d'amendements. Elle est généralement de 25 lb/pi ³ pour le fumier de poulets à griller ou les matières compostées, et peut souvent dépasser 50 lb/pi ³ dans le cas de fumier solide de bovins contenant beaucoup de litière. Conversion : $\text{kg/m}^3 \times 2,2 \div 35,31 = \text{lb/pi}^3$
Soufre (S)	627 ppm	320 ppm	0,63 kg/t (3,2 kg/m ³)	Une grande proportion se présente sous forme de soufre organique ou élémentaire, qui est libéré lentement grâce à l'activité microbienne. Un épandage régulier de fumier fournit habituellement une quantité de soufre adaptée aux besoins des cultures. Si l'épandage est peu fréquent, les cultures de canola ou de luzerne pourraient manquer de cet élément nutritif, surtout si le sol est frais et humide.
Conductivité électrique (conductivité)	10 mS/cm	14 mS/cm	6,4 kg/t (9 kg/m ³)	Tous les sels : K, NH_4 , Mg, Ca, Al et le sodium (Na). La conductivité électrique et le sodium (Na) sont tous deux des mesures de la teneur en sel. Ils ont une teneur élevée en sel et peuvent causer des dommages (semis/germination) si on plante les cultures trop rapidement après l'épandage, ou si la matière a été épandue à la surface (semis direct) par temps très sec.
Sodium (Na)	0,86 %	0,06 %	8,6 kg/t (0,6 kg/m ³)	Le sodium est un type de sel qui favorise la conductivité électrique. C'est notamment celui que l'on trouve dans la nourriture humaine et animale. Le compost de déchets alimentaires et certains types de fumier contiennent beaucoup de sodium.

Suite à la page suivante

Suite de la page précédente

Tableau 9-14 – Interprétation des résultats d’analyses de fumier

Le calcul des éléments nutritifs peut se faire à partir d’une analyse dans le logiciel NMAN 3, disponible à l’adresse ontario.ca/omafra, ou au moyen de la feuille de calcul électronique se trouvant au www.gocorn.net.

LÉGENDE : – = aucune donnée disponible

Composantes	Exemple de fumiers liquide et solide			Commentaires
	Exemple d’analyse		Estimation des éléments nutritifs biodisponibles – Fumier solide (fumier liquide)	
	Fumier solide	Fumier liquide		
Aluminium (Al)	1 200 ppm	154 ppm	1,2 kg/t (0,15 kg/m ³)	Les oligo-éléments sont indiqués selon leur présence dans l’amendement organique.
Bore (B)	6 ppm	4 ppm	0,006 kg/t (0,004 kg/m ³)	La biodisponibilité varie en fonction de l’état du sol, de l’activité microbienne, de la teneur en matière organique et de la fertilité du sol.
Calcium (Ca)	1,3 %	0,35 %	13 kg/t (3,5 kg/m ³)	En général, pendant l’année de l’épandage, environ la moitié du soufre, du calcium et du magnésium est assimilable.
Cuivre (Cu)	24 ppm	15 ppm	0,02 kg/t (0,02 kg/m ³)	Environ les deux tiers du bore, du cuivre, du fer, du manganèse et du zinc sont biodisponibles.
Fer (Fe)	990 ppm	210 ppm	1,0 kg/t (0,21 kg/m ³)	
Magnésium (Mg)	0,31 %	0,11 %	3,1 kg/t (1,1 kg/m ³)	
Manganèse (Mn)	88 ppm	30 ppm	0,09 kg/t (0,03 kg/m ³)	
Zinc (Zn)	78 ppm	36 ppm	0,08 kg/t (0,04 kg/m ³)	

kg/t x 2 = ~ lb/t. c. kg/m³ x 10 = ~ lb/1 000 gal

Des teneurs en azote, en phosphore ou en oligo-éléments du fumier qui se révèlent supérieures à la moyenne peuvent indiquer que les concentrations de ces éléments dans la ration sont plus élevées que ce qui est nécessaire. L’apport d’acides aminés pour contrebalancer l’azote, la diminution de la quantité de phosphore dans les suppléments minéraux ou l’ajout de phytase (une enzyme qui augmente l’absorption du phosphore chez l’animal) sont des moyens de réduire les teneurs de ces éléments nutritifs dans le fumier. Il est essentiel de consulter un nutritionniste animal avant de modifier les rations.

Plusieurs laboratoires en Ontario offrent des services d’analyse du fumier. On doit prélever les échantillons après avoir bien agité ou mélangé le fumier, chaque fois que la cellule de stockage est vidée (p. ex. au printemps et à l’automne). Après plusieurs analyses, il devrait se dégager une tendance dans les résultats. On doit en outre prendre des échantillons lorsqu’on change la ration ou d’autres facteurs de gestion.

Lorsqu’on envoie un échantillon au laboratoire, il faut remplir la moitié d’un contenant en plastique, le fermer, l’insérer dans un sac de plastique et le garder dans un endroit frais jusqu’à son expédition. L’analyse doit porter sur l’azote total, l’azote ammoniacal

(NH₄-N), le phosphore, le potassium et la matière sèche. Une analyse des oligo-éléments, comme le soufre, le pH, la matière organique et le ratio carbone-azote (pour le fumier solide), peut fournir des données précieuses pour l’épandage d’engrais. Les résultats d’analyse transmis par les laboratoires accrédités du MAAARO indiquent les pourcentages d’azote, de phosphore, de potassium et de matière sèche ainsi que la quantité d’azote ammoniacal et d’oligo-éléments en mg/kg (ou ppm) épandus. Dans la plupart des rapports, les pourcentages de phosphore, de potassium et d’oligo-éléments importants provenant du fumier sont convertis en équivalents en engrais commerciaux. Par ailleurs, les rapports indiquent souvent dans quelle mesure on peut réduire les apports en engrais commerciaux.

Pour plus de renseignements sur l’interprétation des analyses de fumier, voir la feuille de calcul du MAAARO *Calcul des éléments nutritifs assimilables à partir de l’analyse du fumier épandu au printemps* et le tableau 9-14, *Interprétation des résultats d’analyses de fumier*. On peut obtenir une estimation plus exacte des éléments nutritifs biodisponibles du fumier épandu en tenant compte des résultats d’analyse du fumier et des données précises sur l’épandage.

Calcul des éléments nutritifs assimilables à partir de l'analyse du fumier épandu au printemps

Il faut utiliser les mêmes unités tout au long du calcul. Certains rapports donnent les teneurs en azote ammoniacal en ppm (mg/kg, mg/l), et d'autres, en pourcentage. Pour convertir les ppm en pourcentages, il faut les diviser par 10 000.

Azote biodisponible¹

- A. Azote total _____
- B. Azote ammoniacal _____
- C. Azote organique³ (A – B) _____
- D. Ammonium préservé
(B x facteur du tableau 9-13) _____
- E. Azote organique biodisponible, formule du tableau 9-14
Fumier liquide : C – (matière sèche ÷ 51)
Fumier solide : C – (matière sèche ÷ 61,4) _____
- F. Azote total biodisponible (D + E)⁴ _____

Phosphate biodisponible²

- G. Phosphore total _____
- H. Phosphore biodisponible
(G x 0,4) _____
- I. Phosphate biodisponible
(H x 2,29) _____

Potasse biodisponible²

- J. Potassium total _____
- K. Potassium biodisponible
(J x 0,9) _____
- L. Potasse biodisponible
(K x 1,2) _____

Remarques

¹ On calcule l'azote biodisponible en soustrayant de l'azote ammoniacal épandu l'ammoniac perdu par volatilisation (dans l'air), puis en additionnant l'azote minéralisé provenant de l'azote organique du fumier.

² Il faut calculer les réductions des doses de phosphate et de potasse en déterminant la partie assimilable du phosphore et du potassium que contient le fumier (40 % dans le cas du phosphore et 90 % dans le cas du potassium) et en multipliant par un certain facteur pour faire la conversion de la forme élémentaire à la forme oxydée (les teneurs en éléments nutritifs dans les engrais sont exprimées sous la forme oxydée). Au cours de l'année de l'épandage, 40 % de l'élément nutritif est biodisponible, et un autre 40 % est assimilable l'année suivante.

³ L'azote organique fournit aussi un apport en azote pendant plusieurs années après l'épandage : 10 % de l'azote est assimilable la 2^e année, 5 % la 3^e année, et 2 % la 4^e année.

⁴ Pour estimer l'azote biodisponible du fumier épandu à l'été ou à l'automne, il faut multiplier l'azote total par le facteur correspondant du tableau 9-13, *Estimation de l'azote biodisponible provenant de fumier épandu à la fin de l'été et à l'automne, sous forme de proportion (facteur) de l'azote total épandu.*

Exemple : Du fumier de bovins laitiers est épandu au printemps à une dose de 55 m³/ha (5 000 gal/ac) avant la plantation de maïs (incorporé dans un délai de trois jours). Il contient 7 % de matière sèche, 0,65 % d'azote total, 0,35 % d'azote ammoniacal, 0,2 % de phosphore et 0,3 % de potassium (données réelles).

Azote biodisponible

- A. Azote total 0,65
- B. Azote ammoniacal 0,35
- C. Azote organique (0,65 – 0,35) 0,30
- D. Ammonium préservé
(0,35 x 0,50) 0,175
- E. Azote organique biodisponible
Fumier liquide : 0,3 – (7 ÷ 51) 0,16
- F. Azote total biodisponible (0,175 + 0,16) 0,34

Éléments nutritifs en kg/m³ (lb/1 000 gal) = 3,4 (34)

Phosphate biodisponible

- G. Phosphore total 0,2
- H. Phosphore biodisponible
(0,2 x 0,4) 0,08
- I. Phosphate biodisponible
(0,08 x 2,29) 0,18

Éléments nutritifs en kg/m³ (lb/1 000 gal) = 1,8 (18)

Potasse biodisponible

- J. Potassium total 0,3
- K. Potassium biodisponible
(0,3 x 0,9) 0,27
- L. Potasse biodisponible (0,27 x 1,2) 0,32

Éléments nutritifs en kg/m³ (lb/1 000 gal) = 3,2 (32)

Cette feuille de travail se trouve dans le logiciel NMAN du MAAARO et sous forme de feuille de calcul électronique au www.gocorn.net.

Conversion des pourcentages en volumes

P. ex. 0,32 x 20 = 6,4 lb/t. c. de potasse biodisponible

Pour obtenir :	Multiplier par :
kg/m ³ (kg/1 000 l)	10
lb/1000 gal	100
kg/t	10
lb/t. c.	20

La valeur du fumier se fonde sur le prix d'achat d'une quantité équivalente d'engrais minéral (janvier 2016).

(N – P₂O₅ – K₂O = 1,30 – 1,35 – 0,95 \$/kg) ou
(N – P₂O₅ – K₂O = 0,60 – 0,61 – 0,43 \$/lb)

Valeur à long terme du fumier

L'analyse de sol est le meilleur moyen d'évaluer la biodisponibilité à long terme du phosphore, du potassium, du magnésium, du zinc ou du manganèse provenant d'épandages antérieurs de fumier. À la longue, l'épandage de grandes quantités de fumier peut amener de fortes concentrations de phosphore et de potassium assimilables dans le sol. Le fumier apporte aussi de la matière organique et d'autres éléments nutritifs pour les plantes qui contribuent à améliorer la structure du sol et son pouvoir tampon.

La majeure partie de l'azote biodisponible que l'on retrouve dans le fumier est absorbé par la culture ou se perd durant la première saison de croissance qui suit l'épandage. L'azote organique restant devient assimilable en petites quantités, lesquelles diminuent graduellement au cours des années suivantes. Beaucoup de facteurs influent sur la biodisponibilité, mais, à des fins de planification, on présume qu'environ 10 % de l'azote organique est assimilable au cours de l'année suivant l'épandage, et que ce taux passe à 5 % et à 2 % pour les deux années subséquentes. En général, la quantité d'azote résiduel provenant de l'épandage de fumier liquide est trop faible pour avoir une incidence réelle sur les directives relatives à l'azote visant une culture. Cependant, lorsque du fumier solide est régulièrement épandu dans un champ, la concentration d'azote résiduel biodisponible peut atteindre un niveau important.

Besoins des cultures

Ce sont les résultats des analyses de sol et les objectifs de rendement qui déterminent en fait les doses maximales d'épandage de fumier et d'engrais additionnels qu'il est rentable d'utiliser. Il arrive souvent que les résultats des analyses de sol des exploitations d'élevage indiquent que la fertilité du sol est tellement grande qu'un apport supplémentaire en éléments nutritifs ne donnerait aucun bénéfice.

Au lieu de calculer les doses d'épandage du fumier en fonction des résultats d'analyse de sol, on peut se fonder sur les quantités d'éléments nutritifs prélevés par la culture et comparer ces dernières aux quantités de phosphore et d'azote provenant du fumier. Cette méthode devrait théoriquement assurer le maintien de la fertilité du sol. Le tableau 9-15, *Prélèvement moyen d'éléments nutritifs (N, P₂O₅, K₂O) par certaines grandes cultures, permet de calculer l'absorption moyenne des éléments nutritifs pour diverses cultures.*

Si les épandages de fumier visent à combler tous les besoins en azote d'une culture de maïs, on se retrouve habituellement avec des concentrations de phosphore et de potassium supérieures à ce que peut assimiler la culture, et l'analyse de sol révélera une augmentation des concentrations de ces éléments nutritifs. Dans le cas du fumier liquide, on considère comme un compromis raisonnable le fait d'en épandre suffisamment pour répondre aux deux tiers ou aux trois quarts des besoins en azote de la culture de maïs. Dans le cas du fumier solide, étant donné la forte teneur en carbone de la litière, la libération d'azote est beaucoup moins prévisible. Compte tenu de la difficulté à épandre uniformément aussi bien le fumier solide que le fumier liquide, il est encore souvent conseillé de recourir à un engrais de démarrage, sauf lorsque les résultats de l'analyse de sol indiquent que cet apport n'augmentera pas le rendement économique.

On doit tenir compte de l'azote résiduel provenant des cultures de légumineuses au moment d'évaluer les besoins en apport supplémentaire d'azote provenant de fumier ou d'engrais. D'ailleurs, voir à ce sujet le tableau 9-9, *Réduction des besoins en azote à la suite de l'enfouissement d'un engrais vert de légumineuses.* Il faut épandre judicieusement le fumier sur des cultures de céréales, de soya ou de canola, étant donné qu'un taux d'application trop élevé augmente l'incidence de la verse.

La technologie de la machinerie fournit de nouveaux moyens d'épandre du fumier sur des cultures en croissance, comme le maïs, les cultures fourragères et les cultures couvre-sol semées après la récolte du blé. Lorsque l'épandage se fait en été sur des cultures fourragères établies, on doit utiliser des doses de NH₄-N inférieures à 45 m³/ha (4 000 gal/ac), ou de 55 à 65 kg/ha (50 à 60 lb/ac). Il faut effectuer les épandages sur les cultures fourragères aussitôt que possible après la récolte afin d'éviter les dommages aux nouvelles pousses, dus au passage des roues, ainsi que les risques de brûlure des nouvelles feuilles par l'azote. On doit éviter d'épandre du fumier concentré à forte teneur en azote ammoniacal (p. ex. du fumier liquide de poules pondeuses ou du fumier concentré de porcs de finition) sur les tissus foliaires des récoltes sur pied. Les peuplements de fourrages plus avancés qui renferment davantage de graminées sont ceux qui profitent le plus de l'azote du fumier.

Bon nombre de producteurs sont aux prises avec des problèmes de compactage, et c'est ce qui explique en grande partie la popularité des épandages de fumier

Tableau 9-15 – Prélèvement moyen d'éléments nutritifs (N, P₂O₅, K₂O) par certaines grandes cultures

Culture	Prélèvement		
	N ¹	P ₂ O ₅	K ₂ O
Grains, oléagineux			
Maïs-grain	11,5 à 18 kg/t (0,65 à 1,0 lb/bo)	6,6 à 7,9 kg/t (0,37 à 0,44 lb/bo)	4,6 à 5,2 kg/t (0,26 à 0,30 lb/bo)
Cannes de maïs	8 kg/t (16 lb/t. c.)	2,9 kg/t (5,8 lb/t. c.)	20 kg/t (40 lb/t. c.)
Soya	62 à 67 kg/t (3,7 à 4,0 lb/bo)	13 à 15 kg/t (0,80 à 0,88 lb/bo)	23 kg/t (1,4 lb/bo)
Résidus de soya	20 kg/t (40 lb/t. c.)	4,4 kg/t (8,8 lb/t. c.)	19 kg/t (38 lb/t. c.)
Blé d'automne (grains seulement)	19 à 21 kg/t (1,15 à 1,25 lb/bo)	9,1 à 10,4 kg/t (0,55 à 0,63 lb/bo)	6,0 kg/t (0,36 lb/bo)
Blé d'automne (paille) ²	7 kg/t (14 lb/t. c.)	1,7 kg/t (3,4 lb/t. c.)	12 kg/t (24 lb/t. c.)
Orge (grains seulement)	18 à 23 kg/t (0,87 à 1,1 lb/bo)	8,0 kg/t (0,40 lb/bo)	5,3 à 7,2 kg/t (0,25 à 0,35 lb/bo)
Orge (paille)	6,5 kg/t (13 lb/t. c.)	2,6 kg/t (5,2 lb/t. c.)	20 kg/t (40 lb/t. c.)
Avoine (grains seulement)	18 à 24 kg/t (0,63 à 0,80 lb/bo)	7,5 kg/t (0,25 lb/bo)	5,8 kg/t (0,19 lb/bo)
Avoine (paille)	6 kg/t (12 lb/t. c.)	3,2 kg/t (6,4 lb/t. c.)	19 kg/t (38 lb/t. c.)
Seigle d'automne (grains seulement)	19 à 22 kg/t (1,1 à 1,2 lb/bo)	6,1 à 8,2 kg/t (0,3 à 0,5 lb/t. c.)	6,25 kg/t (0,35 lb/t. c.)
Seigle d'automne (paille)	6 kg/t (12 lb/t. c.)	1,5 kg/t (3 lb/t. c.)	11 kg/t (22 lb/t. c.)
Haricots secs	42 kg/t (2,5 lb/bo)	14 kg/t (0,83 lb/bo)	14 kg/t (0,83 lb/bo)
Canola	40 à 44 kg/t (2,0 à 2,2 lb/bo)	22 à 27 kg/t (1,1 à 1,3 lb/bo)	11 à 13 kg/t (0,55 à 0,67 lb/bo)
Ensilage/cultures fourragères (prélèvement dans la matière sèche)^{3,4}			
Ensilage de maïs	11 à 15 kg/t (22 à 30 lb/t. c.)	4,6 à 6,8 kg/t (9,2 à 16,6 lb/t. c.)	8,3 à 15 kg/t (16,6 à 30 lb/t. c.)
Ensilage préfané de légumineuses	27 à 37 kg/t (54 à 74 lb/t. c.)	5,3 à 7,9 kg/t (10,6 à 15,8 lb/t. c.)	22 à 35 kg/t (44 à 70 lb/t. c.)
Ensilage préfané mixte	23 à 34 kg/t (46 à 68 lb/t. c.)	5,2 à 7,8 kg/t (10 à 16 lb/t. c.)	22 à 35 kg/t (45 à 71 lb/t. c.)
Ensilage préfané de graminées	16 à 27 kg/t (32 à 54 lb/t. c.)	4,9 à 7,8 kg/t (9,8 à 15,6 lb/t. c.)	20 à 36 kg/t (40 à 72 lb/t. c.)
Foin de légumineuses	22 à 33 kg/t (44 à 66 lb/t. c.)	5,2 à 8,0 kg/t (10,4 à 16 lb/t. c.)	21 à 35 kg/t (42 à 70 lb/t. c.)
Foin mixte	17 à 27 kg/t (34 à 54 lb/t. c.)	5,0 à 7,2 kg/t (10 à 14,4 lb/t. c.)	17 à 30 kg/t (34 à 60 lb/t. c.)
Foin de graminées (1 ^{re} coupe)	13 à 23 kg/t (26 à 46 lb/t. c.)	4,4 à 7,0 kg/t (8,8 à 14 lb/t. c.)	14 à 28 kg/t (28 à 56 lb/t. c.)
Foin mixte (2 ^e coupe) ⁵	25 à 36 kg/t (50 à 72 lb/t. c.)	5,7 à 7,8 kg/t (11,4 à 15,6 lb/t. c.)	20 à 32 kg/t (40 à 64 lb/t. c.)

Source : Chiffres fondés sur des données de l'Ontario, dans la mesure du possible, et sur des données générales nord-américaines (International Plant Nutrition Institute), lorsque les données locales sont insuffisantes.

Les données sur les cultures fourragères proviennent des laboratoires agroalimentaires de Guelph (1990 à 1995).

¹ L'azote prélevé par le soya, les haricots secs et les fourrages de légumineuses est surtout d'origine atmosphérique.

² Les quantités de P₂O₅ et de K₂O dans les céréales à paille et le foin sec seront réduites (par lessivage) si des précipitations fréquentes ou abondantes ont lieu lorsque la paille est en andains groupés dans le champ.

³ Pour convertir le rendement « récolté » en rendement en « matière sèche », il faut multiplier le rendement récolté par le contenu en matière sèche de la culture (p. ex. : 25 tonnes de maïs d'ensilage x 40 % de matière sèche (60 % d'humidité) = rendement en matière sèche de 10 tonnes).

⁴ La fourchette du prélèvement d'azote est large, parce que le foin récolté a diverses teneurs en protéines. De façon générale, plus la teneur en protéines est élevée, plus les rendements sont bas.

⁵ La 2^e coupe contient habituellement plus de légumineuses.

sur les cultures en croissance et en fin d'été ou au début de l'automne. Le compactage nuit au drainage et à l'aération du sol. Le meilleur moyen de l'atténuer ou de l'éviter est d'épandre le fumier lorsque le sol est sec. L'épandage par système d'irrigation peut réduire la compaction, tout comme les pneus radiaux et les options de gonflage des pneus offertes avec le matériel d'épandage de fumier. Il faut aussi s'assurer de maintenir la charge par essieu en deçà de 4,5 tonnes (5 t. c.). Les épandages de printemps sont souvent effectués sur des champs détrempés; il n'est pas rare qu'on puisse localiser les voies empruntées par la machinerie simplement à partir des bandes de cultures rabougries dans le champ.

Problèmes environnementaux liés au fumier

Pour réduire au minimum les problèmes environnementaux liés au fumier, on peut aussi appliquer aux épandages de fumier le concept du 4R, utilisé couramment concernant les engrais :

- Bon produit
- Bon endroit
- Bon moment
- Bon dosage

Le fumier a des caractéristiques particulières qui le distinguent des engrais : comme on ne peut ajuster la concentration en éléments nutritifs (c.-à-d. les ratios d'azote, de phosphore et de potassium) du fumier, on peut l'utiliser conjointement avec des engrais commerciaux pour combler les besoins des cultures. Inversement, l'apport en certains éléments nutritifs peut excéder les besoins, mais la culture (ou rotation des cultures) doit pouvoir les assimiler au fil du temps. Il est possible de régler ce problème en préparant un plan de gestion des éléments nutritifs.

On peut déterminer le moment de l'épandage en fonction de la production et de la capacité de stockage du fumier. Il ne faut pas que les éléments nutritifs (surtout l'azote inorganique) restent longtemps à la surface avant que la culture les absorbe. On peut envisager de semer des cultures couvre-sol si le fumier est épandu à la fin de l'été ou au début de l'automne.

L'épandage sur des champs en pente abrupte ou sur des sols imperméables peut favoriser le ruissellement du fumier lorsque les doses sont trop élevées. Pour certains types de sol, il peut être nécessaire de faire plusieurs épandages à dose réduite. L'épandage de

fumier l'hiver ou au début du printemps crée des risques de ruissellement et d'accumulations d'éléments nutritifs dans les eaux de surface. Il ne faut jamais épandre du fumier sur un sol couvert de neige ou gelé en raison du risque de ruissellement des éléments nutritifs : comme le lisier ne peut pas s'infiltrer dans le sol, le phosphore se déplace avec les eaux de fonte et les particules de sol. Aucun plan de gestion des éléments nutritifs ne devrait prévoir d'épandage en hiver, mais il est possible d'épandre du fumier au cours d'un redoux si ce dernier est incorporé immédiatement. Lorsqu'il est indispensable de faire des épandages durant l'hiver (c.-à-d. dans le cadre d'un plan d'urgence), il faut se limiter aux champs qui présentent le plus faible risque de contamination des eaux de surface par ruissellement.

La contamination de l'environnement est interdite selon la *Loi sur la protection de l'environnement* (1990), la *Loi sur les ressources en eau de l'Ontario* (1990), et la *Loi sur les pêches* (1985) du gouvernement fédéral. De plus, la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs* et le Règlement 267/03 comportent des exigences précises concernant l'épandage du fumier. Consulter les plus récentes versions de la réglementation et des protocoles à l'adresse ontario.ca/fr/lois.

La pluie peut provoquer le lessivage de l'azote organique vers les cours d'eau quand le fumier a été épandu sur des terres non protégées. Le phosphore, attaché aux particules de sol, peut être entraîné jusqu'aux cours d'eau sous l'effet de l'érosion. Des pratiques de conservation du sol peuvent réduire les risques de pollution des cours d'eau par les éléments nutritifs.

Une zone tampon végétale située le long des cours d'eau protège ces derniers contre la contamination par le fumier épandu dans les champs adjacents et contre l'érosion des berges. Le potentiel de ruissellement dépend de l'inclinaison du champ et de la texture du sol. L'eau qui circule dans les réseaux de drainage souterrain peut devenir contaminée si le fumier pénètre dans un puisard ou s'infiltré dans les drains agricoles par des fissures dans le sol ou des galeries formées par des vers de terre ou des racines. Pour réduire le risque de contaminer l'eau qui circule dans les réseaux de drainage, il faut épandre de faibles

doses lorsque les drains ne sont pas en fonction ou travailler superficiellement le champ avant l'épandage afin de supprimer les grands pores.

L'épandage de fumier ou d'engrais dont les éléments nutritifs dépassent les besoins d'une culture risque d'entraîner la contamination des eaux souterraines, surtout aux endroits où la couche de terre recouvrant le substratum rocheux est mince, là où la nappe phréatique se trouve près de la surface ou dans les sols très sableux où le lessivage pose problème. La contamination des eaux souterraines peut se produire par le lessivage ou l'infiltration des nitrates dans les fissures et les trous du sol. Il est également possible que le fumier s'infilte directement dans l'eau de puits mal protégés. Il faut éviter d'épandre du fumier à moins de 15 m (50 pi) de puits forés, de 30 m (100 pi) de puits ordinaires, ou de 100 m (330 pi) d'un puits municipal. Voir la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs* et l'article 43 du Règlement 267/03.

Les gros élevages situés sur des terres de faible superficie posent des défis particuliers. Pour éviter d'épandre trop d'éléments nutritifs, il faut préparer un plan de gestion à cette fin. Il peut aussi être nécessaire de signer des ententes avec des exploitations voisines pour s'assurer de disposer de suffisamment de champs pour l'épandage du fumier.

Des renseignements détaillés sur les doses d'épandage maximales et les distances de retrait à respecter par rapport aux eaux de surface ou aux puits figurent dans le logiciel NMAN 3, disponible à l'adresse ontario.ca/omafra.

Atténuation des risques liés à l'azote

Le cycle de l'azote, vu les nombreuses formes que celui-ci prend, est un processus complexe influencé par de nombreux facteurs, notamment les conditions météorologiques, les caractéristiques du sol et divers processus biologiques, chimiques et physiques. Il faut employer la quantité optimale d'azote nécessaire à la production culturale tout en gardant à l'esprit que toute portion d'azote non utilisée peut s'infiltrer sous la zone des racines, se volatiliser dans l'atmosphère ou se dénitrifier (éventuellement en oxyde nitreux).

Les nitrates qui risquent d'être lessivés vers la zone des racines proviennent notamment du surplus d'azote non prélevé par la culture et de l'azote du fumier ou des biosolides épandus hors de la saison de croissance (à la fin de l'été ou à l'automne). En Ontario,

l'infiltration dans les eaux souterraines se produit la plupart du temps de la fin de l'automne au début du printemps, lorsque les précipitations dépassent l'évaporation. Dans des sols sableux bien drainés, la majeure partie des nitrates présents à l'automne peut être lessivée dans les eaux souterraines pendant le drainage. Dans les sols lourds, la perte se produit surtout par dénitrification. En réduisant la quantité de nitrates présente dans le sol à l'automne, on diminue les deux types de pertes.

Exemples de pratiques culturales réduisant le risque de perte de nitrates :

- Utilisation de cultures couvre-sol quand du fumier est appliqué en fin d'été ou en début d'automne;
- Épandage d'azote aux moments où la culture en a besoin (bon moment);
- Harmonisation de la quantité d'azote total épandu avec les besoins des cultures (bon dosage).

Évaluation des risques liés au phosphore

Le risque de contamination des eaux de surface par le phosphore peut s'accroître lorsque les analyses révèlent une teneur élevée en cet élément nutritif. Toutefois, comme le phosphore se lie étroitement aux particules du sol, le déplacement du sol par érosion constitue également un facteur déterminant du risque de contamination. C'est pourquoi on ne peut pas se fonder uniquement sur la teneur en phosphore déterminée par l'analyse de sol pour évaluer le risque de contamination des eaux de surface.

Le risque de contamination des eaux de surface par le phosphore augmente dès qu'une analyse de sol révèle que pour atteindre un rendement économique maximal, il n'est pas nécessaire d'épandre plus de phosphore mais qu'il faut tout de même épandre du fumier. La présence de phosphore dans les sources d'eau de surface favorise l'eutrophisation, ou la croissance de plantes aquatiques (prolifération d'algues), ce qui fait varier la teneur en oxygène et nuit à la capacité de cette source d'eau de soutenir la vie aquatique. Dans l'optique de protéger l'environnement contre les risques que constitue l'apport supplémentaire en phosphore lorsque les teneurs du sol en cet élément sont adéquates selon l'analyse de sol, un indice-phosphore a été élaboré. L'utilisation de cet indice permet de réduire les doses d'épandage et de créer de plus grandes zones tampons exemptes de phosphore à proximité des cours d'eau où les risques d'érosion et de ruissellement des éléments nutritifs sont importants et lorsque les teneurs en phosphore sont élevées.

Le calcul de l'indice-phosphore tient compte :

- du risque d'érosion du sol;
- du risque de ruissellement;
- de la teneur du sol en phosphore;
- de la méthode (bon endroit) et de la dose d'épandage (bon dosage) des engrais et du fumier.

Le MAAARO met actuellement au point une nouvelle version de l'indice-phosphore, qui tient aussi compte des effets des drains agricoles, de la solubilité de divers types de fumier et du risque de perte hors de la saison de croissance. Pour en savoir plus sur l'évaluation des risques liés au phosphore, voir la fiche technique du MAAARO intitulée *Détermination de l'indice-phosphore dans un champ* ou visiter le site Web.ontario.ca/cultures.

Fumier et semis direct

L'objectif du semis direct, c'est de réduire la perturbation du sol et des lits de semence. L'objectif de l'épandage de fumier, dans une culture en semis direct, c'est de fournir les éléments nutritifs dont les cultures et les micro-organismes présents dans le sol ont besoin, et d'ajouter de la matière organique pour améliorer la santé du sol. L'épandage de fumier est des plus efficaces lorsque les éléments nutritifs sont incorporés. Quand on épand du fumier sur des champs en semis direct, des compromis sont nécessaires : il faut travailler un peu le sol, autrement une partie des éléments nutritifs seront perdus. Les avancées dans les technologies d'épandage et les techniques d'application pendant la culture (y compris l'épandage de fumier à l'aide de barres d'aspersion sous le feuillage ou l'ensemencement de cultures couvre-sol combiné à l'épandage après la récolte de céréales) permettent d'épandre du fumier dans des champs en semis direct tout en réduisant au minimum les pertes d'éléments nutritifs.

Lorsqu'on envisage d'épandre du fumier dans une culture en semis direct, il est bon de tenir compte de certains points, notamment les suivants :

- On doit planifier les épandages de fumier en tenant compte des rotations des cultures et des applications pendant la culture, surtout quand on fait du semis direct pur et dur et que les éléments nutritifs ne sont pas incorporés par travail du sol.
- La meilleure solution consiste à épandre le fumier après une récolte de blé ou de céréales de printemps. Un travail du sol superficiel effectué à la verticale ou à l'aide de disques lorsque le sol est sec permettra

d'incorporer la paille des céréales ainsi que le fumier et même de semer des cultures couvre-sol. Lorsque le temps est chaud et sec, les vers de terre restent profondément dans la terre; le travail minimal du sol ne détruira pas les galeries qu'ils créent, et l'azote facilitera la décomposition de la paille.

- Il faut épandre le fumier dans les champs de maïs lorsque les sols sont secs afin d'éviter la formation d'ornières et la compaction. On peut aussi faire des épandages en bandes sur le maïs sur pied. Si l'apport en éléments nutritifs, surtout l'azote, est l'objectif principal, il faut déterminer ce qui est le plus important : un travail du sol planifié restreint, ou une certaine perte d'azote. La quantité d'azote qui risque d'être perdue dépend du type de fumier épandu. Comme le fumier solide contient moins d'azote ammoniacal, il y aura moins de perte d'azote au total. Plus la teneur en azote organique est élevée, moins il y a d'azote biodisponible, mais plus l'azote est alors libéré sur une longue période. Lorsque le fumier est épandu en surface sur un sol dénudé, la majeure partie de l'azote ammoniacal qu'il contient sera perdue. S'il pleut (10 à 15 mm ou environ 1/2 po de pluie qui pénètre en douceur) peu après l'épandage, une partie de l'azote ammoniacal sera incorporée au sol.
- Même si la pourriture à sclérotose pose moins problème dans les cultures en semis direct, le fumier épandu avant les semis de soya entraîne souvent une densification du couvert végétal, ce qui accentue les risques. On doit choisir un cultivar présentant une certaine résistance à cette maladie.
- L'épandage de fumier liquide sur des cultures fourragères est une bonne solution. Il faut épandre le fumier aussitôt que possible après la récolte, avant la repousse. L'apport en éléments nutritifs est supérieur lorsque le fumier est épandu sur de vieux peuplements de luzerne.
- Lorsque le fumier est épandu à la surface de champs en semis direct, il y a de plus grands risques de ruissellement du phosphore dans les cours d'eau, surtout quand l'application est faite hors de la saison de croissance. En augmentant les résidus ou les cultures couvre-sol, le producteur limitera ce phénomène, mais quand le fumier est épandu sur un terrain en pente, il vaut mieux prévoir une zone tampon (végétaux ou distance de retrait) par rapport aux cours d'eau ou aux parties du champ où l'écoulement de l'eau est concentré.
- Il ne faut jamais prévoir d'épandre du fumier sur un sol gelé ou couvert de neige, car il y a alors des risques élevés de ruissellement des éléments nutritifs (surtout du phosphore). On doit éviter d'épandre du

fumier liquide sur des cultures fourragères vivaces recouvertes de neige, puisque de la glace peut se former sous le fumier et risquer d'aggraver les dommages hivernaux et le ruissellement.

- Il est important de faire évaluer les teneurs en éléments nutritifs du fumier quelle que soit la culture, de manière à pouvoir ajuster les doses d'engrais commerciaux selon la composition du fumier.
- Des doses importantes de fumier épandu en surface peuvent ralentir le réchauffement du sol au printemps ou faire croûter le sol. Il est donc essentiel de calibrer les épandeurs afin d'obtenir le bon dosage.

Calibrage des épandeurs

Le calibrage du matériel d'épandage du fumier est indispensable. On peut recourir à différentes méthodes pour mesurer les doses d'épandage : l'une d'elles consiste à peser la charge de fumier et à mesurer la superficie qu'elle peut couvrir. Une autre méthode consiste à peser le fumier solide en étalant des feuilles de plastique sur le sol. Dans le cas du fumier liquide, on peut employer des seaux à parois verticales pour mesurer la profondeur des applications. Il faut tenir compte des chevauchements, surtout quand on utilise des systèmes d'irrigation. Le tableau 9-16, *Calibrage des épandeurs de fumier*, présente une estimation des doses d'épandage, et le tableau 9-17, *Densité de différents types de fumier*, compare la densité de divers types de fumier. Pour de plus amples renseignements, visiter le site Web du MAAARO à l'adresse ontario.ca/cultures.

Tableau 9-17 – Densité de différents types de fumier

Type de fumier	Densité			
Fumier liquide	1 000 kg/m ³	62 lb/pi ³	1,0 kg/l	80 lb/bo
Fumier semi-solide	960 kg/m ³	60 lb/pi ³	0,9 kg/l	76 lb/bo
Fumier solide – épais	800 kg/m ³	50 lb/pi ³	0,8 kg/l	64 lb/bo
Fumier solide – léger	560 kg/m ³	35 lb/pi ³	0,6 kg/l	45 lb/bo
Compost et litière sèche de volaille	400 kg/m ³	25 lb/pi ³	0,4 kg/l	30 lb/bo
1 bo = 1,25 pi ³				

Tableau 9-16 – Calibrage des épandeurs de fumier

Fumier solide – Calibrage ¹		Fumier liquide – Calibrage ²	
Quantité par feuille	Dose d'épandage ³	Profondeur du fumier liquide dans le seau	Dose d'épandage
0,5 kg	3,6 t/ha	2,5 mm (1/10 po)	25 m ³ /ha (2 225 gal imp./ac) (2 675 gal US/ac)
0,9 kg	7,2 t/ha	3,2 mm (1/8 po)	32 m ³ /ha (2 850 gal imp./ac) (3 420 gal US/ac)
1,4 kg	10,8 t/ha	6,4 mm (1/4 po)	64 m ³ /ha (5 520 gal imp./ac) (6 845 gal US/ac)
1,8 kg	14,3 t/ha	10 mm (4/10 po)	100 m ³ /ha (8 900 gal imp./ac) (10 690 gal US/ac)
2,3 kg	17,9 t/ha	12,7 mm (1/2 po)	127 m ³ /ha (11 305 gal imp./ac) (13 580 gal US/ac)
3,2 kg	25,1 t/ha	15,0 mm (6/10 po)	150 m ³ /ha (13 355 gal imp./ac) (16 040 gal US/ac)
4,5 kg	35,8 t/ha	19,1 mm (3/4 po)	191 m ³ /ha (17 000 gal imp./ac) (20 420 gal US/ac)
6,8 kg	53,8 t/ha	25,4 mm (1 po)	254 m ³ /ha (22 610 gal imp./ac) (27 160 gal US/ac)

1 m³ = 1 000 l

¹ À l'aide d'une feuille de 122 x 102 cm (sac de moulée en plastique de 40 x 48 po).

² À l'aide d'un seau à parois verticales.

³ t. c./ac = t/ha x 0,45.

Utilisation de matières de source non agricole dans les champs

Les déchets de source non agricole (p. ex. biosolides d'épuration) sont des matières organiques traitées, riches en éléments nutritifs, qui proviennent d'usines municipales de traitement des eaux usées. Ils contiennent généralement de l'azote organique et minéral, du phosphore, de la potasse, de la matière organique et des oligo-éléments comme le zinc, le magnésium et le cuivre. Pour un producteur, l'épandage de biosolides fait dans le cadre d'un plan de gestion des éléments nutritifs peut apporter les mêmes avantages que le fumier. Ces matières de source non agricole (MSNA) sont d'ailleurs idéales pour les grandes cultures.

Régies par la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs* et le Règlement 267/03, les MSNA comprennent les rejets des papetières, les sous-produits du traitement des grains et de nombreux autres déchets organiques. Chaque type de déchet a des caractéristiques particulières pouvant améliorer la qualité du sol ou la production culturale. Il est important de connaître les teneurs en éléments nutritifs ou les précautions associées à chaque matière; les biosolides d'épuration, par exemple, contiennent très peu de potassium.

Les MSNA sont classées dans trois catégories. Elles peuvent toutes être épandues sur des terres agricoles, mais les normes d'épandage varient selon la catégorie et la qualité de la matière.

- Catégorie 1 : Matières végétales non traitées (p. ex. restes de légumes)
- Catégorie 2 : Matières végétales traitées (p. ex. déchets organiques d'une boulangerie)
- Catégorie 3 : MSNA d'origine animale (p. ex. résidus organiques d'une usine de transformation de la viande, biosolides de pâtes et papiers, biosolides d'épuration municipaux)

Dans le règlement, on exige maintenant un plan MSNA au lieu d'un certificat d'autorisation pour un site de conditionnement de sol organique de terres agricoles. Ce plan est semblable à un plan de gestion des éléments nutritifs, mais concerne uniquement le ou les champs où des MSNA sont épandues, et non l'ensemble de l'exploitation. Les plans MSNA doivent être préparés par un concepteur certifié de plans MSNA.

Certaines MSNA (biosolides d'épuration) subissent un traitement supplémentaire qui les stabilise et sont ensuite considérées comme des engrais commerciaux enrichis de matière organique. Ces produits sont enregistrés auprès de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA), et il n'est pas nécessaire de préparer un plan MSNA pour les utiliser à l'heure actuelle. Voici des exemples de ces produits :

- N-Viro – biosolides traités au moyen de poussière de four pour les enrichir de chaux;
- Biosolides granulés – biosolides traités, transformés en granules et traités thermiquement;
- Lystek – processus breveté de traitement thermique et de lyse qui permet de combiner des biosolides avec de l'hydroxyde de potassium.

Engrais

Les engrais azotés sont offerts sous forme solide ou liquide. Leur emploi est assorti de certaines restrictions (voir la section *Toxicité des engrais*). Soulignons que l'urée et l'ammonium sont susceptibles de se volatiliser lorsqu'ils sont laissés à la surface sans être incorporés. Il faut choisir l'engrais en fonction de sa disponibilité, du matériel de manutention dont on dispose, du coût de l'azote au kilogramme, des coûts d'épandage et des risques de perte. Plus la quantité de nitrates est élevée, plus il y a de risques de pertes par lessivage ou dénitrification.

On doit calculer le coût par kilogramme des diverses sources d'azote livré sur place. Le coût à l'hectare peut être calculé à partir de la dose d'épandage. Il faut additionner les coûts d'épandage par hectare avant d'arrêter son choix sur une source d'azote.

Quand les directives relatives aux engrais indiquent de faire des amendements séparés d'azote, il faut compter les kilogrammes d'azote élémentaire et non les kilogrammes d'engrais. Les tableaux 9-18, *Engrais – Éléments nutritifs primaires et secondaires*, et 9-19, *Engrais – Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments*, montrent les teneurs en éléments nutritifs (exprimées en pourcentage) de différents engrais.

Outre les produits mentionnés au tableau 9-18, *Engrais – Éléments nutritifs primaires et secondaires*, divers mélanges contenant un ou plusieurs oligo-éléments sont offerts par les fabricants d'engrais.

Le zinc est plus assimilable par les plantes sous forme de sulfate que d'oxide. Le zinc chélaté est plus cher au poids que les autres formes, mais environ deux fois plus efficace que les sulfates contenant une quantité équivalente de zinc. On utilise le zinc chélaté ou le ligninesulfonate dans les solutions d'engrais liquides ou pour des traitements foliaires. Les autres sources indiquées au tableau 9-19, *Engrais – Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments*, sont des formules sèches pour lesquelles il faut avant tout tenir compte du pourcentage de solubilité.

Une large gamme d'engrais liquides sont utilisés en Ontario. Ils reviennent généralement plus chers par unité d'élément nutritif que les engrais secs en granules, mais peuvent être plus faciles à manipuler. Les caractéristiques des engrais liquides les plus fréquemment utilisés sont présentées au tableau 9-20, *Densités des engrais liquides les plus répandus*.

Tableau 9-18 – Engrais – Éléments nutritifs primaires et secondaires

Matière	Forme	Éléments nutritifs primaires	Soufre	Indice de sel ¹	Indice de sel ²
Azote (N)					
Nitrate d'ammonium (34-0-0)	Sec	30 à 34 %		104	14,5
Nitrate d'ammonium et de calcium (27-0-0)	Sec	27 %		93	15,3
Urée (46-0-0)	Sec	45 à 46 %		73	8,1
Sulfate d'ammonium (21-0-0)	Sec	21 %	24 %	88	16,3
Nitrate d'ammonium et d'urée (28-0-0)	Liquide	28 %		63	11,3
Ammoniac anhydre (0-0-82)	Liquide ³	82 %		47	2,9
Phosphate (P₂O₅)					
Phosphate monoammonique (11-52-0)	Sec	48 à 52 %		27	2,0
Phosphate diammonique (18-46-0)	Sec	46 %		29	2,3
Polyphosphate d'ammonium (10-34-0)	Liquide	34 %		20	2,3
Potasse (K₂O)					
Chlorure de potassium (0-0-60)	Sec	60 à 62 %		115	9,7
Sulfate de potassium (0-0-50)	Sec	50 %	18 %	46	4,3
Sulfate de potasse et de magnésie (0-0-22)	Sec	22 %	20 %	43	9,9
Nitrate de potassium (13-0-44)	Sec	44 %		74	6,1

¹ La pression osmotique s'accroît quand on dissout dans l'engrais l'équivalent en poids de nitrate de sodium (100).

² Exprimé par unité (100 lb) d'élément nutritif (N + P₂O₅ + K₂O).

³ Liquide sous pression.

Tableau 9-19 – Engrais – Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments

Éléments nutritifs	Quantité
Magnésium (Mg)	
Chaux dolomitique	6 à 13 % de Mg
Sulfate de magnésium (sel d'Epsom)	10,5 % de Mg 14 % de S
Sulfate de potasse et de magnésie	11 % de Mg 20 % de S
Soufre (S)	
Sulfate de calcium (gypse)	19 % de S
Soufre élémentaire	90 % de S
Thiosulfate d'ammonium	12 % de N 26 % de S
Bore (B)	
Borate de sodium	12 à 21 % de B
Solubor	20,5 % de B
Cuivre (Cu)	
Sulfate de cuivre	13 à 25 % de Cu
Cuivre chélaté	5 à 13 % de Cu
Manganèse (Mn)	
Sulfate de manganèse	26 à 28 % de Mn
Manganèse chélaté	5 à 12 % de Mn
Molybdène (Mo)	
Molybdate de sodium	39 % de Mo
Zinc (Zn)	
Sulfate de zinc	36 % de Zn
Zinc chélaté	7 à 14 % de Zn
Oxysulfate de zinc	18 à 36 % de Zn

Sels solubles dans les terres agricoles

De fortes concentrations de sels solubles dans le sol peuvent empêcher ou retarder la germination et même tuer les plants déjà établis ou, du moins, en ralentir sérieusement la croissance.

À l'état naturel, les sols de l'Ontario renferment peu de sels solubles. Par conséquent, ceux-ci occasionnent rarement des problèmes aux cultures et ne sont pas couramment mesurés dans les analyses de sol.

Les sels solubles dans le sol peuvent provenir de doses excessives d'engrais et de fumier, de certains types de compost, du ruissellement du sel épandu sur les routes et du déversement de produits chimiques sur les terres agricoles. De fortes concentrations de sels solubles dans les bandes de fertilisation, ou à proximité de ces dernières, peuvent freiner considérablement le développement des plantes, en début de croissance, sans

Tableau 9-20 – Densités des engrais liquides les plus répandus

Composition	kg/l	l/t	gal imp./t	lb/l	lb/gal imp.
8-25-3	1,33	749,9	165,1	2,94	13,35
6-18-6	1,28	779,0	171,6	2,83	12,85
3-11-11	1,25	798,8	175,7	2,76	12,55
6-24-6	1,33	752,4	165,8	2,93	13,30
9-18-9	1,33	755,0	165,8	2,92	13,30
5-10-15	1,25	799,0	171,6	2,83	12,85
2-10-15	1,28	784,6	172,9	2,81	12,75
10-34-0	1,40 à 1,41	715,8 à 711,2	157,5 à 156,4	3,08 à 3,10	14,0 à 14,1
28 %	1,28	781,8	172,2	2,82	12,8
Acide phosphorique 54 %	1,58	633,5	139,5	3,48	15,8
1 gal imp. = 1,201 gal US = 4,546 l lb/gal imp. x 0,832 = lb/gal US			1 gal US = 0,8326 gal imp. = 3 785 l gal imp./t x 0,832 = gal US/t		

toutefois avoir d'effets marqués sur les concentrations de sel dans le reste du sol. La concentration de sel dans l'eau du sol s'accroît quand il y a peu d'eau.

Les sels solubles interfèrent aussi avec l'absorption de l'eau par les plantes. C'est pourquoi la croissance des plantes est plus affectée par la présence de sels solubles quand le temps est sec au moment de la plantation.

On peut facilement déterminer en laboratoire ou sur le terrain la teneur en sels solubles en mesurant la conductivité électrique d'un mélange pâteux d'eau et de terre. Plus la concentration de sels solubles dans l'eau est élevée, plus la conductivité est forte. Le tableau 9-21, *Interprétation des résultats de conductivité du sol*, permet d'interpréter, comme son nom le dit, les résultats de conductivité du sol : « F » signifie « faible », « M » moyen, « É » élevé, et « T » trop élevée. Certaines dissolutions nuisent davantage aux plantes (p. ex. Na⁺, Cl⁻) que d'autres (Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻); ainsi, quand les sels posent problème, la détermination des concentrations d'ions permet de faire un meilleur diagnostic que la conductivité électrique.

Toxicité des engrais

Tous les sels des engrais chimiques sont toxiques pour les racines et les graines en germination lorsqu'ils se trouvent en concentrations suffisantes près de celles-ci. La toxicité par unité d'élément nutritif dépend des facteurs suivants :

- la proportion de sels que l'engrais contient par unité d'élément nutritif;
- les différences de solubilité des sels dans le sol;
- la présence de certains constituants ou éléments qui sont particulièrement toxiques (p. ex. ammoniac, bore).

De nombreux engrais azotés, même s'ils présentent une faible teneur en sel, libèrent de l'ammoniac libre dans le sol.

Exemple de calcul des doses d'engrais requis

D'après les résultats des analyses de sol et du calculateur d'azote, un producteur doit appliquer 120 lb de N, 18 lb de P_2O_5 et 30 lb de K_2O dans son champ de maïs. Un engrais liquide de démarrage (5 gal/ac de 6-24-6) sera également épandu.

Étape 1 : Calculer l'apport fourni par l'engrais de démarrage.

Un engrais liquide 6-24-6 ayant une densité de 13,3 lb/gal est épandu à une dose de 5 gal/ac.

L'engrais contient 6 % de N, 24 % de P_2O_5 et 6 % de K_2O . La dose d'épandage est calculée comme suit : 5 gal/ac x 13,3 lb/gal = 66,5 lb/ac.

N : 66,5 lb/ac x 6/100 = 4 lb/ac

P_2O_5 : 66,5 lb/ac x 24/100 = 16 lb/ac

K_2O : 66,5 lb/ac x 6/100 = 4 lb/ac

Étape 2 : Calculer les doses d'engrais à ajouter.

$120 - 4 = 116$ lb de N à ajouter par acre

$18 - 16 = 2$ lb de P_2O_5 par acre (différence négligeable)

$30 - 4 = 26$ lb de K_2O à ajouter par acre

Étape 3 : Calculer la quantité d'engrais additionnelle requise pour combler les besoins de la culture.

On calcule les doses d'engrais en divisant les quantités d'éléments nutritifs requises par la proportion de cet élément contenue dans l'engrais. Si l'engrais additionnel est un mélange d'urée et de potasse, le calcul se fera comme suit :

116 lb/ac de N \div 0,46 (ou 46 %) = 252 lb/ac d'urée (46-0-0)

26 lb/ac de K_2O \div 0,62 (ou 62 %) = 42 lb/ac de chlorure de potassium (0-0-60)

Dose totale épandue : 252 + 42 = 294 lb/ac du mélange d'engrais.

Pour plus d'information sur le calcul des éléments nutritifs requis par les cultures et sur les mélanges d'engrais, voir la publication 611F du MAAARO, *Manuel sur la fertilité du sol*.

Engrais azotés

Le nitrate d'ammonium, le phosphate monoammonique et le sulfate d'ammonium ont une toxicité semblable et sont beaucoup moins dangereux que l'ammoniac anhydre, l'hydroxyde d'ammonium et l'urée. Le phosphate diammonique est plus toxique que le phosphate monoammonique, mais moins que l'urée. Il faut réduire les doses d'urée ou augmenter les distances entre les semences et la bande d'engrais, surtout dans le cas de semences sensibles comme les haricots ou les pois, et dans les sols à texture grossière (sables et loams sableux).

Comme l'ammoniac anhydre et l'hydroxyde d'ammonium libèrent de l'ammoniac libre, ils ne devraient pas être épandus près des semences. Il est donc préférable d'appliquer ces engrais au présemis, perpendiculairement à la direction du semis. Une réduction de la densité de peuplement de la bande peut malgré tout se produire dans des sols très secs ou si les semis ont lieu trop tôt après l'application.

L'urée est toxique quand elle est appliquée en bandes avec les semences ou près d'elles, mais est sans danger si on l'épand à la volée à une dose normale. Les mélanges dont la teneur en azote est supérieure à la moitié de la quantité de phosphate contiennent souvent de l'urée.

Engrais phosphatés

La plupart des engrais phosphatés ne sont guère toxiques puisqu'une grande partie du phosphate est précipitée dans le sol avant même d'entrer en contact avec les racines. La concentration du phosphore en solution dans le sol est toujours très basse, de sorte qu'il n'existe aucune limite quant aux quantités à appliquer près des semences de cultures faites en champ ou avec elles.

Le phosphate diammonique est plus dommageable que les autres engrais phosphatés. Voir la section *Engrais azotés* à ce sujet.

Tableau 9-21 – Interprétation des résultats de conductivité du sol

Selon un ratio eau-sol de 2:1. Pour obtenir l'équivalent en pâte saturée, il faut multiplier par cinq.

Conductivité du sol (millisiemens/cm)	Cote	Réaction des plantes
0 à 0,25	F	Convenable pour la plupart des plantes si les quantités recommandées d'engrais sont utilisées.
0,26 à 0,45	M	Convenable pour la plupart des plantes si les quantités recommandées d'engrais sont utilisées.
0,46 à 0,70	É	Pourrait réduire la levée et causer des dommages allant de légers à graves aux plantes sensibles au sel.
0,71 à 1,00	T	Pourrait réduire la levée et causer des dommages allant de légers à graves à la plupart des plantes.
1,00	T	Causera probablement de graves dommages à la plupart des plantes.

Engrais potassiques

Le chlorure de potassium (KCl) est la source de potassium la plus courante dans les engrais. Il est moins dommageable par unité d'élément nutritif que la plupart des engrais azotés.

Le sulfate de potassium (K_2SO_4) contient moins de sel que le chlorure de potassium. Le sulfate de potasse et de magnésie est à peu près aussi toxique par unité de potassium que le chlorure de potassium. Le nitrate de potassium est l'une des sources de potassium les moins dangereuses.

Le tableau 9-22, *Doses maximales sûres des éléments nutritifs dans les engrais*, présente les doses maximales d'éléments nutritifs qui sont sécuritaires pour diverses cultures. Les doses indiquées s'appliquent pour l'épandage d'un seul engrais. Si des épandages de deux éléments nutritifs et plus sont combinés, l'effet cumulatif peut endommager la culture même si les doses d'épandage sont individuellement en deçà du seuil de nuisibilité.

Directives relatives à l'application sans danger d'éléments nutritifs pour les semis

La toxicité des engrais varie grandement selon le degré d'humidité du sol. Les dommages se produisent plus fréquemment sur des sols à texture grossière (sableux ou graveleux) dont la teneur en matière organique est faible, et par temps sec. Pour s'assurer qu'en toutes circonstances les engrais appliqués en bandes ne seront pas nocifs, il faut en appliquer de très faibles quantités. Les doses maximales suggérées ici pourraient réduire ou retarder la germination ou la croissance jusque dans 10 % des cas. C'est pourquoi on recommande généralement d'utiliser au semis des quantités plus faibles que celles indiquées dans le tableau 9-22, *Doses maximales sûres des éléments nutritifs dans les engrais*.

L'application excessive d'engrais peut endommager les plantules sous l'effet de l'ammoniac et du sel, en raison du contenu en azote et en potassium des engrais. C'est pourquoi on recommande généralement d'utiliser au semis des quantités plus faibles que celles indiquées. Si les besoins en engrais sont élevés, il est parfois préférable d'en épandre la majeure partie à la volée et de n'appliquer qu'une faible portion en bandes au moment du semis.

Les engrais sont plus dommageables lorsqu'ils contiennent du bore, du cuivre, du fer, du manganèse et du zinc. Par conséquent, les doses maximales auxquelles on peut les utiliser sans danger sont inférieures à celles qui sont indiquées dans le tableau 9-22. Le bore est particulièrement toxique et ne devrait pas être appliqué en bandes.

Certains producteurs épandent en bandes des doses beaucoup plus élevées d'engrais qu'il n'est recommandé ici, sans problème apparent. Les cultures tolèrent des doses d'engrais beaucoup plus élevées pourvu que le taux d'humidité soit adéquat, mais il est impossible de prévoir les mauvaises conditions qui peuvent survenir à la germination. Il est toujours plus prudent de ne pas dépasser les doses maximales sûres.

Tableau 9-22 – Doses maximales sûres des éléments nutritifs dans les engrais

LÉGENDE : – = aucune donnée NR = non recommandé

Culture	Engrais	Azote			Azote + potasse + soufre		
		Rangs espacés de 75 cm (30 po)	Rangs espacés de 38 cm (15 po)	Rangs espacés de 18 cm (7 po)	Rangs espacés de 75 cm (30 po)	Rangs espacés de 38 cm (15 po)	Rangs espacés de 18 cm (7 po)
Engrais appliqué en bandes – 5 cm (2 po) à côté et 5 cm (2 po) au-dessous des semences							
Maïs ¹	Urée	40 kg/ha	–	–	79 kg/ha	–	–
	Autres engrais	52 kg/ha	–	–	117 kg/ha	–	–
Soya ² , pois, haricots secs	Sulfate d'ammonium	30 kg/ha	60 kg/ha	–	NR	NR	–
	Autres engrais	NR	NR	–	90 kg/ha	180 kg/ha	–
Engrais avec la semence³							
Maïs	Autres engrais	NR	NR	–	10 kg/ha	20 kg/ha	–
Blé d'automne, triticale, orge	Autres engrais	–	–	15 kg/ha	–	–	40 kg/ha
Avoine de printemps, orge, blé	Urée	–	NR	10 kg/ha	–	–	30 kg/ha
	Autres engrais – sols sableux	–	NR	35 kg/ha	–	–	55 kg/ha
	Autres engrais – argile	–	–	45 kg/ha	–	–	70 kg/ha
Canola	Sulfate d'ammonium – sols sableux	–	–	22 kg/ha	–	–	11 kg/ha
	Sulfate d'ammonium – argile	–	–	22 kg/ha	–	–	33 kg/ha
Application à la volée							
Maïs	Urée	200 kg/ha	–	–	250 kg/ha	–	–

100 kg/ha = 90 lb/ac

¹ À des doses plus élevées, il faut placer l'engrais à au moins 15 cm (6 po) des semences. Lorsque l'espace entre les rangs n'est pas de 75 cm, on peut ajuster la dose d'engrais pour uniformiser la concentration maximale dans le rang. Par exemple, dans des rangs espacés de 50 cm (20 po), la dose sûre se calcule ainsi : $75/50 \times 52 = 78$ kg/ha (70 lb/ac) d'azote.

² Comme les concentrations élevées d'azote nuisent à la nodulation, il n'est pas recommandé d'en épandre une grande quantité.

³ Il n'est pas recommandé d'appliquer de l'urée avec la semence dans les cultures de maïs, de soya ou de blé d'automne.

L'application excessive d'engrais peut endommager les plantules sous l'effet de l'ammoniac et du sel, en raison du contenu en azote et en potassium des engrais. La toxicité varie grandement selon la texture du sol, le taux d'humidité, la culture, ainsi que la source et le mode d'application des engrais. Le tableau 9-22, *Doses maximales sûres des éléments nutritifs dans les engrais*, fournit des directives qui permettront en général de limiter les dommages, notamment un taux de germination réduit et des retards de croissance, à moins de 10 % des cas. Les conditions météorologiques, le stress et les autres facteurs qui influent sur la croissance peuvent augmenter les risques de dommages.

Engrais foliaires

L'apport en oligo-éléments peut se faire par fertilisation foliaire, particulièrement lorsque les carences sont attribuables à l'immobilisation des éléments nutritifs dans le sol (p. ex. du manganèse). La quantité d'éléments nutritifs qu'il est possible d'épandre par cette méthode est limitée à cause du risque de brûler les feuilles. Lors de la préparation d'un mélange d'éléments nutritifs, il faut s'assurer que la solution n'est pas trop concentrée. On doit consulter l'étiquette des pesticides avant d'y mêler des éléments nutritifs pour pulvérisation foliaire.

Il n'est pas pratique d'épandre des oligo-éléments à travers le feuillage, vu la concentration et la quantité limitées d'éléments nutritifs qui peuvent être pulvérisés. Certains éléments nutritifs peuvent être épandus en quantité importante de cette manière, d'autres non.

Calcul des besoins en engrais

On calcule les besoins en engrais minéraux pour un rendement optimal des cultures en soustrayant les éléments nutritifs provenant du fumier et des légumineuses des besoins totaux en éléments nutritifs. Il est souvent avantageux de séparer du reste de l'azote et du potassium la portion d'engrais de démarrage comprise dans le fertilisant, qui est généralement riche en phosphore.

Le choix de l'engrais de démarrage dépend du type de culture, des besoins en engrais minéraux et de la machinerie disponible. Il est souvent aussi efficace d'épandre une partie de l'engrais comme engrais de démarrage et d'épandre le reste à la volée que d'épandre tout l'engrais au semoir. Cette façon de faire permet d'économiser temps et énergie, et présente moins de risques de dommages aux plantules. L'application à la volée d'engrais phosphatés à la surface, sans incorporation, augmente par contre les risques d'atteinte à la qualité de l'eau. Il faut envisager d'autres options si possible.

On doit soustraire les épandages d'engrais de démarrage et en bandes latérales des besoins totaux en engrais minéraux. Le reste doit être appliqué à la volée. S'il ne reste que de très petites quantités, on peut ajuster les doses de l'une des autres sources d'éléments nutritifs, ignorer les quantités restantes, ou encore prévoir une application d'engrais qui répond aux besoins sur plusieurs années (phosphore et potassium uniquement).

Citations

Tableau 9-3 – *Capteurs servant à définir les zones de gestion et paramètres mesurés*

Adaptation de :
AGRICULTURE RESEARCH & EXTENSION COUNCIL OF ALBERTA. *Sensors - Precision Farming and Variable Rate Technology: A Resource Guide*, 2010.

Tableau 9-15 – *Prélèvement moyen d'éléments nutritifs (N, P₂O₅, K₂O) par certaines grandes cultures*

Adaptation de :
MURRELL, T.S. « Average nutrient removal rates for crops in the northcentral region », 2005. En ligne : www.ipni.net/article/IPNI-3258.

Tableau 9-18 – *Engrais – Éléments nutritifs primaires et secondaires*

Adaptation de :
FOLLETT, R.H., L.S. MURPHY et R.L. DONAHUE. *Fertilizers and Soil Smendments*, Prentice Hall inc., Englewood Cliffs (New Jersey), 1981.

JOSEPH, Jez (rédacteur). *Sulfur: A Missing Link between Soils, Crops, and Nutrition*, Agronomy Monographs n° 50 (chapitre *Sulfur Forms and Cycling Processes in Soil and Their Relationship to Sulfur Fertility*, par SCHOENAU, J. et S.S. MALHI, American Society of Agronomy), 2008, p. 1 à 10. ISBN : 978-0-89118-186-6.